

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica
Laboratório de Plasma

**Estudo e Implementação de um Processo de Fabricação de
Microponteiras de Si Utilizando Plasma de Hexafluoreto de
Enxofre e Oxigênio**

Autor: Juliano Fujioka Mologni

Orientador: Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação da Universidade Estadual de
Campinas como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área
de Concentração: **Microeletrônica.**

Banca Examinadora

Edmundo da Silva Braga, Dr.....DEMIC/FEEC/UNICAMP
Lucila Cescato, Dra.....IFGW/UNICAMP
Marco Antônio Robert Alves, Dr.....DEMIC/FEEC/UNICAMP
Douglas de Freitas Takeuti, Dr.....Pesquisador Colaborador/UNICAMP

Campinas, SP

Novembro de 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M739e Mologni, Juliano Fujioka
Estudo e implementação de um processo de fabricação de microponteiras de Si utilizando plasma de hexafluoreto de enxofre e oxigênio / Juliano Fujioka Mologni. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Edmundo da Silva Braga
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Cristais de silício – Propriedades elétricas. 2. Plasma (Gases ionizados). 3. Gravura por plasma. I. Braga, Edmundo da Silva. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

RESUMO

Desenvolvemos e caracterizamos um processo de fabricação de microponteiros de silício utilizando plasma de radiofrequência (RF). Foram estabelecidos processos de corrosão iônica reativa (RIE) do silício e dióxido de silício em um reator de placas paralelas utilizando SF_6 e a mistura gasosa SF_6/O_2 . Foram caracterizadas as grandezas exigidas ao processo de fabricação, tais como taxa de corrosão, seletividade, anisotropia e qualidade da superfície, e foram comparadas a outros processos. Foram analisados e caracterizados os mecanismos de corrosão do processo desenvolvido.

Microponteiros de silício com diferentes razões de aspectos foram caracterizadas e fabricadas utilizando a mistura gasosa em diferentes proporções. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se um plasma com uma concentração de 25% de oxigênio e 75% de hexafluoreto de enxofre.

ABSTRACT

We have developed and characterized a silicon microtip fabrication process using radiofrequency (RF) plasma. Reactive Ion Etching processes of silicon and silicon dioxide in a parallel plate reactor were established using SF₆ and SF₆/O₂ gas mixture. The parameters of the fabrication process, such as the etch rate, selectivity, anisotropy and surface quality were characterized and compared with other processes. The etching mechanisms of the developed process were analyzed and characterized.

Silicon microtips with different aspect ratios were fabricated and characterized using the gaseous mixture at different concentrations. The best results were obtained using plasma comprised of 25% of oxygen and 75% of sulfur hexafluoride.

Aos meus pais

Ismael Mogni e Celina Kazuko Fujioka Mogni

*que sempre me apoiaram e incentivaram,
acreditando que pudesse realizar este
trabalho.*

Esse trabalho foi realizado com o apoio das seguintes entidades:

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

CAPES - Auxílio Bolsa de Mestrado

FAPESP

CNPq

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga pela oportunidade, orientação, confiança, dedicação, paciência e apoio prestado durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Robert Alves pelo apoio e auxílio prestado durante as atividades profissionais.

Aos amigos de laboratório Jaques, Lésnir, Renata e Pedro pelo incentivo, pela cooperação e ótimo ambiente de trabalho.

A todo pessoal do CCS/UNICAMP, em especial ao Prof. Dr. José Alexandre Diniz e ao Prof. Dr. Jacobus Willibrodus Swart pelas várias conversas e esclarecimentos, ao Godoy e a Mara, pela ajuda e paciência durante os procedimentos laboratoriais.

A todo pessoal do IFGW/UNICAMP, em especial ao Édson pela ajuda na realização da microscopia eletrônica e ao Prof. Dr. Mário Antonio Bica de Moraes pelo auxílio no uso do perfilômetro.

A todos aqueles que participaram desse trabalho e que foram involuntariamente omitidos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 RESUMO BIBLIOGRÁFICO	16
2.1 Conceitos Básicos de Plasma	16
2.2 Sistema Planar de Plasma de RF	17
2.3 Corrosão Iônica Reativa (Reactive Ion Etching – RIE).....	19
2.3.1 Mecanismos Responsáveis pela Corrosão no Modo RIE	24
2.4 Configuração do Modo Corrosão por Plasma (Plasma Etching – PE)	25
2.4.1 Mecanismos Responsáveis pela Corrosão Química	27
2.5 Mecanismos de Corrosão Química do Silício por Plasmas Fluorados	28
2.6 Corrosão de Silício por Plasma de Hexafluoreto de Enxofre e Oxigênio	31
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	34
3.1 Preparação das Amostras.....	35
3.1.1 Oxidação	36
3.1.2 Limpeza	36
3.1.3 Processo Fotolitográfico.....	37
3.1.4 Corrosão do Dióxido de Silício por Plasma de CF_4	38
3.2 Características Experimentais dos Processos Executados neste Trabalho	38
3.2.1 Descrição do Sistema de Corrosão Utilizado	39
3.2.2.1 Taxa de Corrosão do Silício	41
3.2.2.2 Anisotropia	42
3.2.2.3 Seletividade	43
3.2.2.4 Fluxo de Gases	44
3.3 Técnicas de Análise	45
3.4 Cálculo do Tempo de Corrosão para Dimensionamento das Ponteiros	46
3.5 Realização das Experiências no Plasma	48
3.5.1 Experiência 1: Corrosão do Silício com variação do Fluxo de Hexafluoreto de Enxofre	49
3.5.1.1 Resultados da Experiência 1	49
3.5.1.2 Análise dos Resultados da Experiência 1.....	51

3.5.2 Experiência 2: Corrosão do Silício com Variação de Fluxos de Hexafluoreto de Enxofre e Oxigênio na Mistura Gasosa.....	53
3.5.2.1 Apresentação dos Resultados da Experiência 2	53
3.5.2.2 Análise dos Resultados da Experiência 2.....	55
3.5.3 Experiência 3: Corrosão do Dióxido de Silício com Variação de Fluxos de Hexafluoreto de Enxofre e Oxigênio na Mistura Gasosa.....	60
3.5.3.1 Resultados da Experiência 3	61
3.5.3.2 Análise dos Resultados da Experiência 3.....	61
3.5.4 Corrosão do Silício para Fabricação de Microponteiras.....	64
3.5.4.1 Apresentação dos Resultados da Experiência 4	64
3.5.4.2 Análise dos Resultados da Experiência 4.....	66
4 CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS	
FUTUROS	75
5 APÊNDICES	76
5.1 Cálculos para a Corrosão das Microponteiras.....	76
5.2 Simulação do Dispositivo Fabricado Utilizando o Método de Elementos Finitos.....	78
5.2.1 Comparação entre os resultados da Simulação do Dispositivo Fabricado e de Outras Estruturas Apresentadas na Literatura	82
6 REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

Os microdispositivos de emissão por campo têm atraído um grande interesse na última década, principalmente no desenvolvimento tecnológico de displays de tela plana. Com a atual demanda pelo aumento das dimensões das telas, iniciou-se a busca por uma tecnologia sucessora aos convencionais tubos de raios catódicos, tendo em vista que sua utilização torna-se inviável devido às limitações impostas por suas dimensões físicas. As matrizes de emissão por campo, *Field Emitter Arrays (FEA)*, constituídas de microponteiros de silício, vem sendo considerada a tecnologia dominante para a nova geração de displays, destacando-se pelo baixo consumo de energia, associado à produção de imagens de alto brilho [1-5].

Uma das características mais atrativas das microponteiros de emissão por campo é que, pela natureza do seu processo de emissão, suas aplicações não se restringem apenas a displays de tela plana, sendo utilizadas também na criação de amplificadores na faixa de microonda, litografia por feixe de elétrons, microscopia eletrônica e sistemas de propulsão espaciais, [2-5].

O avanço tecnológico dos dispositivos de emissão de campo depende muito do desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de fabricação, que podem aumentar a densidade de dispositivos por mm^2 , assim como melhorar as características de emissão eletrônica dos mesmos (figura de mérito ou fator de melhoramento de campo) [6].

O objetivo do presente trabalho é estudar e estabelecer um processo de fabricação de microponteiros utilizando uma mistura gasosa de hexafluoreto de enxofre e oxigênio em um sistema de plasma de radiofrequência (RF).

2 RESUMO BIBLIOGRÁFICO

Os processos para fabricação de dispositivos de emissão de campo ou mesmo para a fabricação de componentes dirigidos à microeletrônica e nanotecnologia são os mais variados possíveis, envolvendo desde soluções aquosas de KOH, TMAH e as suas mais variadas composições e condições possíveis [7] até processos com feixes de íons e os processos chamados a seco [8-10]. Dentre os processos a seco, os mais utilizados atualmente são as corrosões por plasma através de suas componentes *Reactive Ion Etching* (RIE) e corrosão por plasma [11]. Dentre suas principais aplicações podemos citar: remoção de filmes orgânicos e inorgânicos; corrosão de substratos diversos e deposição de filmes finos [11-13].

2.1 Conceitos Básicos de Plasma

O conceito geral de plasma mais conhecido é o do chamado quarto estado da matéria, diferente dos estados sólido, líquido e gasoso. Existem na literatura diferentes especificações para este estado da matéria: plasma quente, plasma frio, termodinamicamente estável e instável, etc [11]. O plasma utilizado em processos voltados para a microeletrônica, comumente chamado de plasma frio, caracteriza-se pelo equilíbrio termodinâmico instável e intervalo de pressões de 0,1 mTorr a 10 Torr (de $1,3 \times 10^{-4}$ mbar a $1,3 \times 10^{-2}$ mbar), concentração dos elétrons, n_e ,

dentro dos limites 10^8 a 10^{13} cm^{-3} e normalmente são obtidos através de descarga gasosa [13]. Uma vez que os elétrons possuem menor massa que os íons e moléculas neutras presentes no plasma, estes adquirem uma maior mobilidade quando aplicada a descarga elétrica ao gás. A energia cinética média dos elétrons em um plasma frio situa-se, na faixa de 1 a 10 eV. Conseqüentemente, obtemos um sistema com equilíbrio termodinâmico instável, onde a temperatura do elétron T_e é maior que a temperatura do gás T_g e temperatura do íon T_i , permitindo assim que colisões entre elétron-molécula provoquem reações de alta temperatura, formando radicais livres, em um gás neutro a baixa temperatura. O volume principal do plasma frio é quase neutro, possuindo concentrações de cargas positivas e negativas quase iguais.

2.2 Sistema Planar de Plasma de RF

Um sistema planar de plasma de RF é constituído de um gerador de RF (ver figura 2.1), operando normalmente em 13,56 MHz (frequência utilizada para evitar interferências com outros sinais presentes no espectro eletromagnético), responsável pela descarga gasosa e ionização dos gases; de uma câmara de reação onde os gases são ionizados e de um sistema de fluxo de gases, com seus respectivos equipamentos para monitoramento e controle, de fluxo de gases, de tensão de RF, pressão, etc...

Dependendo do modo como é acoplado o sinal de RF aos eletrodos do reator, poderemos ter duas configurações do sistema. Quando o sinal de RF é acoplado capacitivamente ao eletrodo onde se localiza o substrato, obtemos a configuração *Reactive Ion Etching – RIE* (corrosão iônica reativa), e quando o eletrodo onde se localiza o substrato é aterrado temos a configuração chamada *Plasma Etching – PE* (corrosão por plasma).

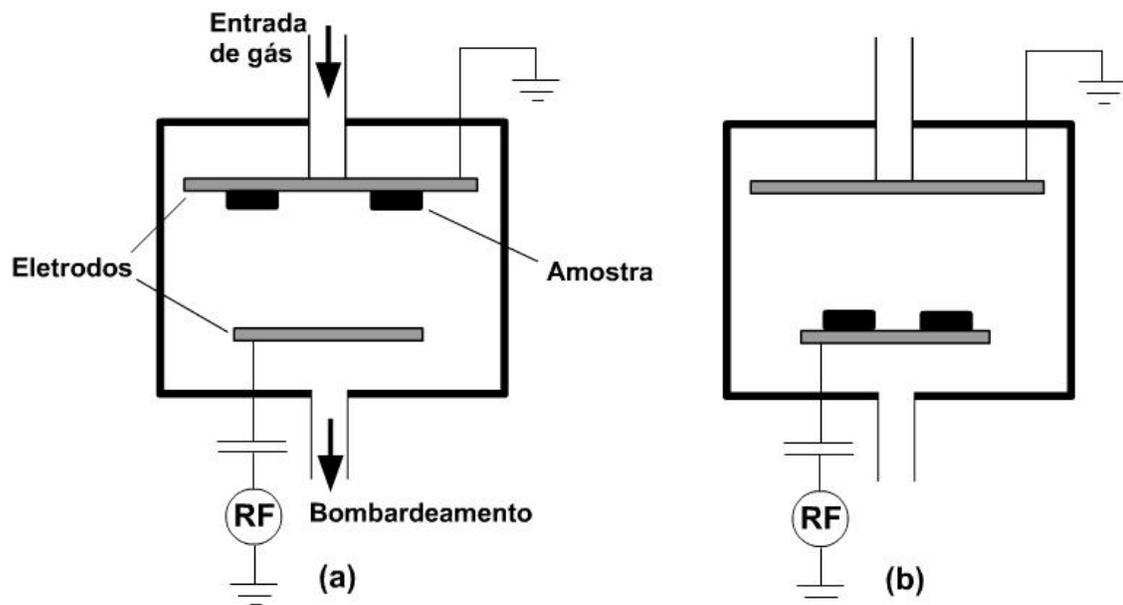


Figura 2.1. Diagrama de um reator de placas paralelas: (a) modo corrosão por plasma, (b) modo de corrosão iônica reativa (Reactive Ion Etching – RIE) [11].

Em sistemas de eletrodos paralelos, os eletrodos têm uma forma planar, circular, e podem ser aproximadamente do mesmo tamanho ou desiguais. Geralmente um dos eletrodos é aterrado juntamente com as paredes do reator, formando um sistema assimétrico. As amostras podem ser colocadas em qualquer um dos eletrodos.

2.3 Corrosão Iônica Reativa (Reactive Ion Etching – RIE)

A corrosão RIE é uma das técnicas de corrosão seca mais utilizadas atualmente. O processo de corrosão denominado RIE opera em base a uma combinação de atividade química de espécies reativas geradas no plasma com efeitos físicos causados pelo bombardeio de íons.

A tensão de RF aplicada aos eletrodos faz com que os elétrons livres presentes no interior da câmara oscilem e colidam com as moléculas eletricamente neutras do gás gerando diversos efeitos [11, 12]:

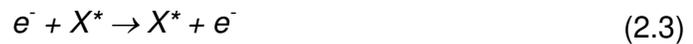
a) Ionização: a interação entre o elétron e uma molécula ou átomo do gás (X) dá origem a um átomo carregado positivamente mais um elétron:



b) Dissociação: a interação entre o elétron e uma molécula do gás (XY) causa a quebra das ligações desta molécula e a decomposição em espécies diferentes, com ou sem ionização:



c) Excitação: a interação não causa a dissociação da molécula ou ionização do átomo, no entanto, gera um estado eletrônico excitado (X^*):



Além de geração de espécies reativas, o sistema promove reações onde elétrons, íons, radicais e energia são removidos do plasma:

d) Recombinação: a interação entre elétron e um íon resulta na formação original do átomo ou molécula do gás, liberando mais uma quantidade de energia (ΔE):



e) Reação com as paredes da câmara: reações entre espécies reativas do plasma com o material das paredes ou dos eletrodos podem resultar em produtos indesejáveis ao processo:



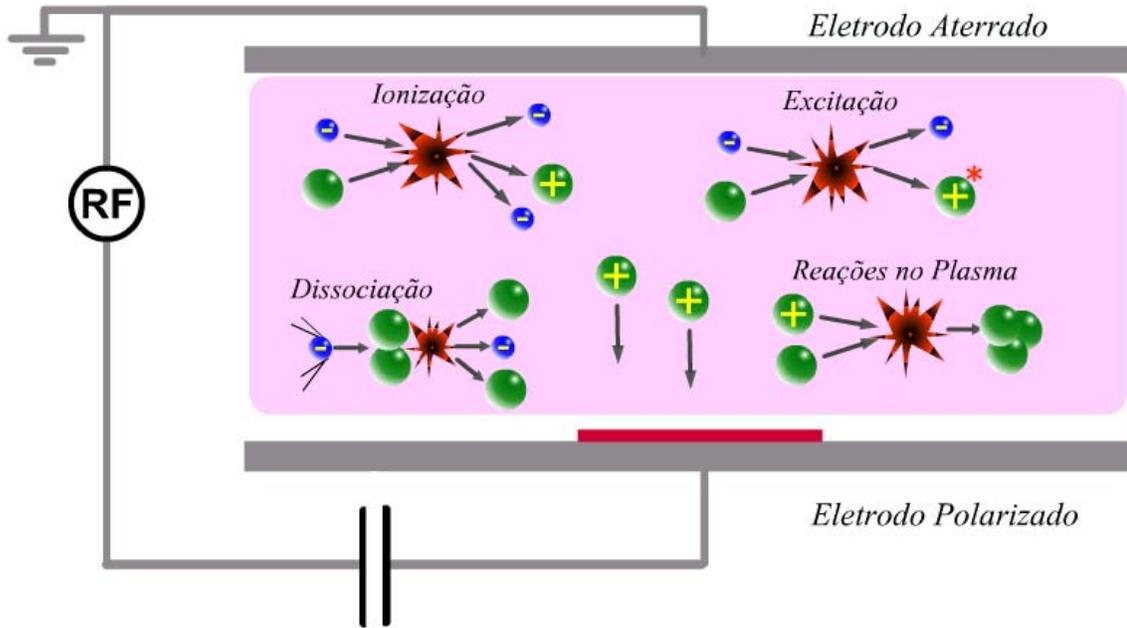


FIGURA 2.2. Esquema de um reator de placas paralelas operando no modo RIE mostrando as principais reações que ocorrem no plasma [11-12].

O eletrodo onde se localiza a amostra é acoplado capacitivamente ao gerador de RF, e este eletrodo desenvolve uma polarização negativa de corrente contínua, *Direct Current – DC*, em relação ao outro eletrodo (ver figura 2.3.a). Esta polarização de DC (chamada também de autopolarização) é induzida pela ação do próprio plasma e estabelecida da seguinte forma: Após a aplicação do sinal de RF (acima de 50 KHz [11]) ocorre a geração do plasma, ou a descarga luminosa. Os elétrons, que possuem menor massa do que os íons, chegam à superfície mais rapidamente, carregando o eletrodo acoplado capacitivamente com um potencial negativo e deixando o plasma com uma carga positiva. Quando o sinal de RF muda de sinal, o capacitor acoplado ao eletrodo se carrega a uma menor taxa devido à menor mobilidade dos íons. Conseqüentemente um campo elétrico médio no tempo é gerado próximo à superfície do eletrodo, retardando os elétrons e acelerando os

íons até que os fluxos médios no tempo se tornem iguais. Em consequência, a superfície adquire um potencial negativo, em relação ao plasma.

O potencial desenvolvido entre a superfície e o volume do plasma é confinado a uma camada que existe em torno de todas as superfícies em contato com o plasma, esta camada é chamada de bainha do plasma.

A energia das partículas carregadas que bombardeiam a superfície em uma descarga RF é determinada por três potenciais diferentes estabelecidos na câmara da reação [14]: o potencial do plasma, V_p , isto é, o potencial da região do corpo do plasma; o potencial de autopolarização $-V_{DC}$, que é chamado também de potencial da bainha; e o potencial de RF aplicado aos eletrodos, V_{RF} , (ver figura 2.3b). O modelo proposto relaciona estes potenciais da seguinte forma:

O potencial estabelecido no eletrodo conectado à fonte e acoplado capacitivamente, $-V_{DC}$ (ver figura 2.3b), repele os elétrons existentes próximos à sua superfície. A depleção de elétrons nessa região cria um campo elétrico na bainha, responsável pelo bombardeio de íons positivos altamente energéticos. Este eletrodo que está acoplado capacitivamente atua efetivamente como um isolante das correntes de DC. O outro eletrodo é aterrado e torna-se automaticamente o ânodo relativo ao eletrodo onde se localiza a amostra. O valor médio no tempo do potencial do plasma, V_p , o potencial de autopolarização, $-V_{DC}$, e o potencial RF pico-pico $(V_{RF})_{pp}$, aplicados ao cátodo estão aproximadamente relacionados segundo a equação 2.6:

$$2.\bar{V}_p \sim \frac{(V_{RF})_{pp}}{2} - |V_{DC}| \quad (2.6)$$

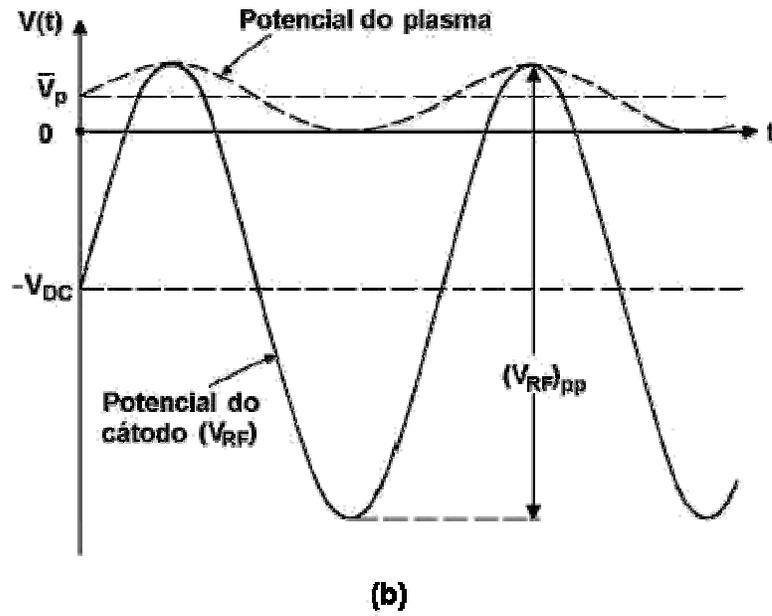
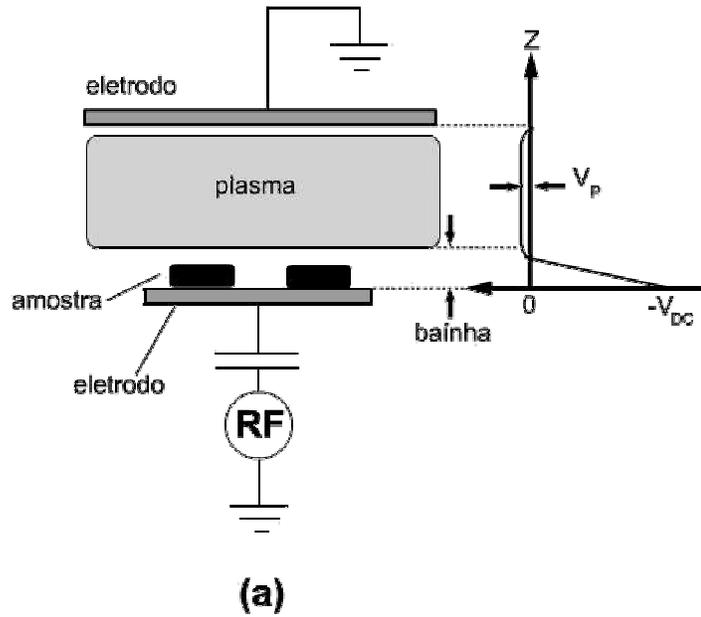


Figura 2.3. Plasma RIE: (a) configuração e distribuição de potencial nos eletrodos [11]; (b) distribuição de potencial no plasma [14].

2.3.1 Mecanismos Responsáveis pela Corrosão no Modo RIE

Uma das mais relevantes características e um dos maiores responsáveis pelo sucesso do RIE é, indiscutivelmente, a interação sinérgica entre os efeitos físicos causados pelo bombardeio de íons e as reações químicas neutras.

Quando uma amostra encontra-se sob ataque de ambos mecanismos simultaneamente, a taxa de corrosão total do material excede a soma numérica das taxas de corrosão individuais de cada mecanismo. Este fenômeno é conhecido como efeito sinérgico [12].

Apesar dos mecanismos do processo de corrosão RIE não serem totalmente compreendidos, uma variedade de teorias foram propostas com a tentativa da explicação do efeito sinérgico [11]:

1. *Modelo de sputtering físico modificado quimicamente.* O modelo explica o efeito dos íons assumindo que a camada superficial, que é modificada quimicamente através do bombardeio iônico, possui uma maior rendimento efetivo de *sputtering* em relação a superfícies não modificadas [15].

2. *Modelo de Danos (Damage Model).* O modelo assume que os danos causados a rede cristalina pelo bombardeio iônico aumenta a taxa de reação entre as espécies neutras e o substrato, tendo como referência primária a taxa de reação de materiais não danificados [16].

3. *Modelo de Sputtering Químico.* O modelo assume que uma quantidade de energia é enviada a superfície de reação através de seqüências de colisões induzidas pelo bombardeamento de íons; esta energia é responsável pelo aumento da mobilidade das moléculas que formam produtos voláteis e desorvem da superfície [17].

De acordo com os modelos propostos, o bombardeio de íons é responsável por uma melhora considerável na performance nas etapas de reação química e de remoção dos produtos voláteis formados na superfície. A predominância de um mecanismo sobre o outro é determinado particularmente para cada combinação entre gás precursor e substrato. O modelo de sputtering químico é o mais adotado para a explicação da corrosão em sistemas Flúor – Silício [11, 17].

2.4 Configuração do Modo Corrosão por Plasma (Plasma Etching – PE)

A configuração de corrosão por plasma, *Plasma Etching - PE*, refere-se à corrosão onde os efeitos físicos são desprezíveis ao processo. A corrosão por plasma nestas determinadas condições é normalmente isotrópica. Para a sua realização, as amostras são alocadas no eletrodo aterrado (ver figura 2.1a), onde a tensão DC de autopolarização é menor (ver figura 2.3a). A única função do plasma neste caso é a geração de espécies quimicamente ativas, tornando este processo muito similar à corrosão química úmida, com a diferença que o processo ocorre em

fase gasosa. O processo pode ser também executado em reatores do tipo barril, utilizando pressões relativamente altas, geralmente 1 torr.

2.4.1 Mecanismos Responsáveis pela Corrosão Química

A corrosão química é predominante nos processos de corrosão no modo configuração corrosão por plasma, contudo, ela é responsável também pela corrosão em processos que utilizam a configuração RIE. A cinética do processo de corrosão química pode ser mais bem compreendida através de um modelo proposto (figura 2.4) constituído de sete etapas interdependentes [18].

A primeira etapa se dá pela introdução do gás na câmara de reações, que geralmente não é capaz de reagir espontaneamente com o material do substrato. Após a aplicação da descarga elétrica de RF, há a geração de espécies reativas (átomos, moléculas, íons) por dissociação e ionização dissociativa.

As partículas reativas difundem até superfície do material e são adsorvidas pela mesma. A próxima etapa, a quimiossorção, consiste na migração destas espécies na superfície, reagindo em seguida com o material do substrato, formando assim, subprodutos que podem ser voláteis (corrosão) ou não voláteis (deposição), dependendo da combinação de gás e substrato utilizado.

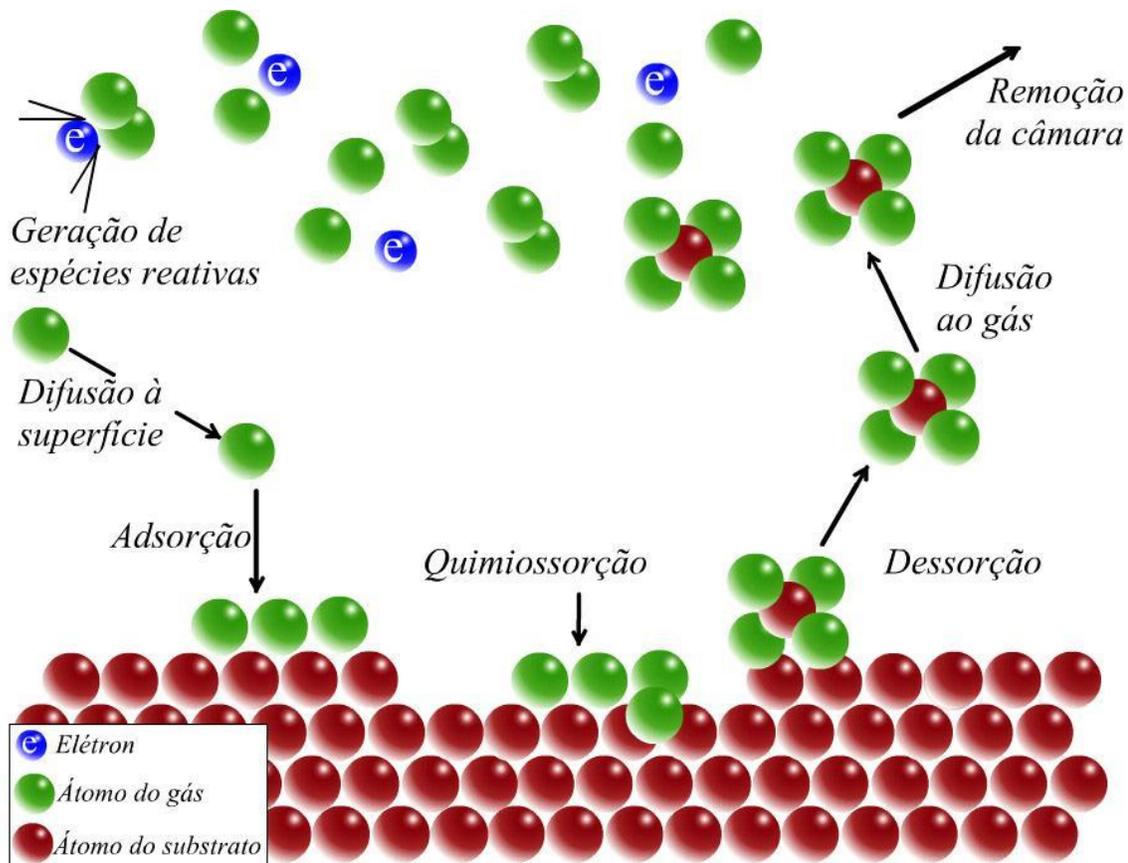


Figura 2.4. Principais etapas da corrosão química no plasma.

A dessorção do produto volátil é fundamental para a conclusão do processo, pois, caso este produto não tenha volatilidade suficiente para se dissolver da superfície, o processo de corrosão é interrompido. Após a dessorção da superfície, os subprodutos são removidos da câmara de reações juntamente com gases não consumidos no processo.

2.5 Mecanismos de Corrosão Química do Silício por Plasmas Fluorados

Tanto na configuração RIE como na configuração plasma ocorre a corrosão química do silício por plasmas de gases que contem flúor. Um dos gases mais utilizados nos processos de corrosão do silício é o SF₆.

Através da análise espectral de plasmas contendo puramente hexafluoreto de enxofre é possível constatar a atuação do flúor atômico como o agente corrosivo primário, encontrado em maior abundância. A corrosão isotrópica do silício pelo flúor atômico produzido em reações químicas no interior do plasma é uma das mais antigas, mais estudadas e mais utilizadas em processos de microfabricação [12].

Dados experimentais mostram que o silício exposto ao flúor atômico adquire uma superfície fluorada (SiF_x) que se estende entre 1 a 5 camadas atômicas em direção ao volume do substrato. No processo de corrosão, átomos de flúor difundem isotropicamente em direção a esta superfície de silício fluorada. Devido à alta complexidade das reações que ocorrem no plasma, alguns detalhes ainda se encontram em investigação, todavia, evidências dão credibilidade ao modelo apresentado na figura 2.5.

O flúor penetra na camada de silício previamente fluorada e reage com átomos de silício. Através da análise espectral do plasma é possível verificar de que o ataque libera dois produtos gasosos que se desolvem da superfície: o radical livre SiF₂ e o produto estável SiF₄.

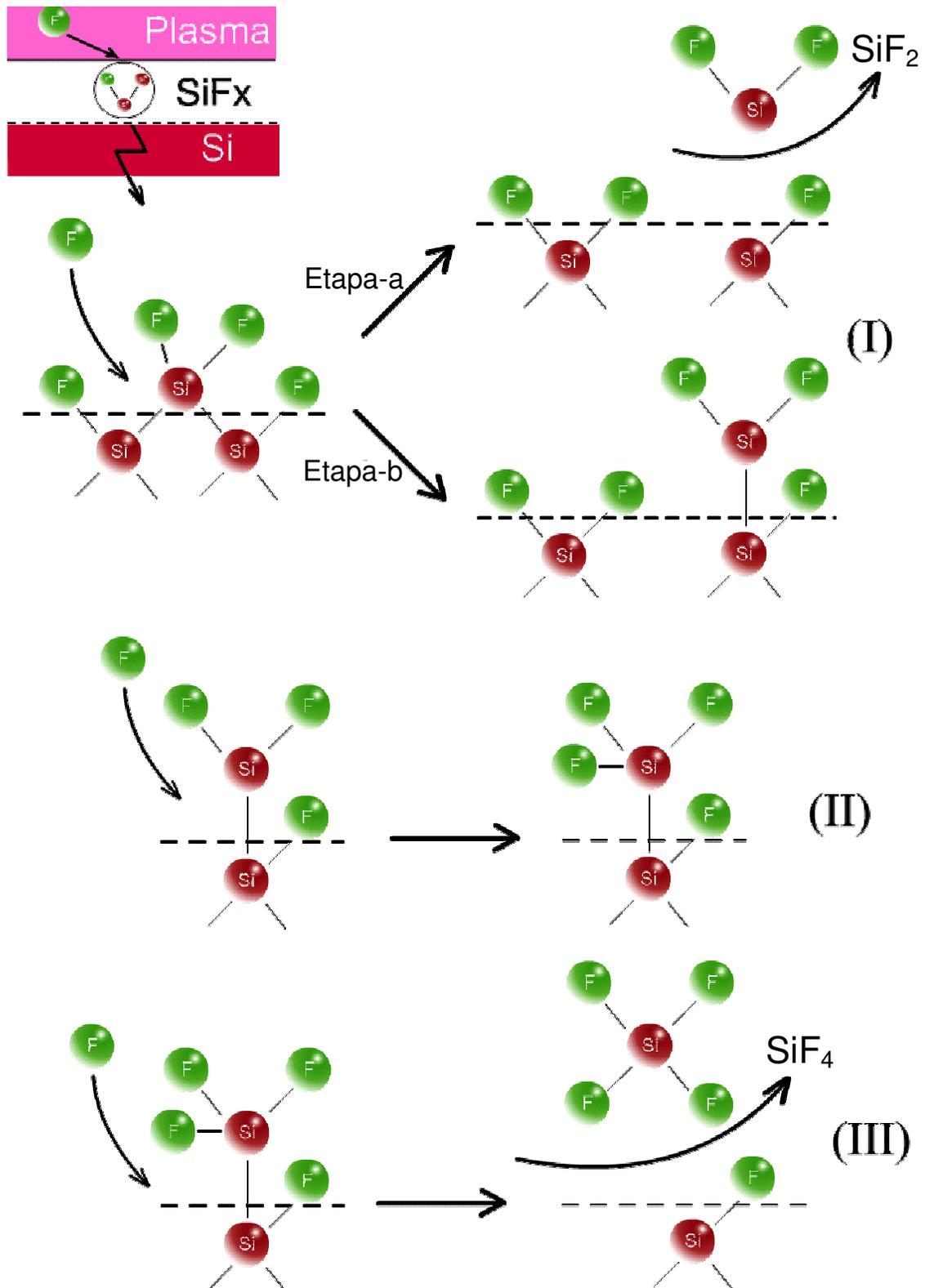
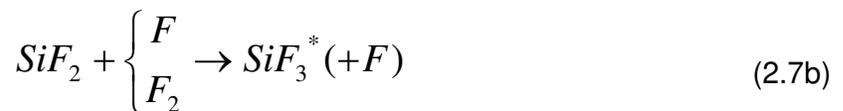
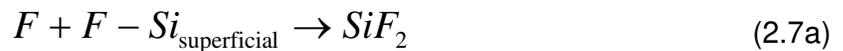


Figura 2.5. Modelo proposto para corrosão do silício por átomos de flúor [12]. A linha tracejada separa a camada superficial fluorada (SiF_x - parte superior) do resto do substrato (parte inferior).

Os dois subprodutos da reação (SiF_2 e SiF_4) possuem exatamente a mesma energia de ativação, possivelmente devido a um estado de ativação em comum que submete a dissociação (formando SiF_2 através da etapa-a na figura 2.5) ou estabilização através da etapa-b.

As espécies estabilizadas formadas pela etapa-b sofrem ataques posteriores de átomos de flúor (passos II-III) formando SiF_4 . A taxa total de corrosão química é a soma das reações de ambos os canais. O produto SiF_2 pode ser analisado separadamente através de espectrometria de emissão óptica, uma vez que sua reação com a fase gasosa F ou F_2 forma o estado excitado SiF_3^* , cuja luminescência, $h\nu$, possui comprimento de onda em torno de 500nm:



A reação converge à etapa-a ou etapa-b estatisticamente, dependendo mais da temperatura da reação do que da temperatura do substrato. Estudos mostram que a maioria do material desorvido da superfície é na forma de SiF_4 , com SiF_2 representando cerca de 5 a 30% do produto total removido [12].

2.6 Corrosão de Silício por Plasma de Hexafluoreto de Enxofre e Oxigênio

A interação do hexafluoreto de enxofre e do oxigênio em um plasma promove reações físico-químicas que desenvolvem uma determinada influência sobre o perfil final da corrosão. O papel do hexafluoreto de enxofre é a produção de átomos de flúor e de íons positivos, responsáveis pela corrosão química do silício e pelo bombardeio iônico, respectivamente [19].

A influência da adição de oxigênio ao plasma de SF₆ já foi tema de estudo de diversos autores [10,19-20], causando inúmeras modificações no sistema. No entanto, podemos citar dois fenômenos de grande importância que interferem diretamente no processo de corrosão.

Primeiramente, a adição de um pequeno fluxo de oxigênio promove a formação de átomos O, que por sua vez, reagem com os radicais reativos resultantes da ionização do plasma de hexafluoreto de enxofre, formando átomos de flúor ($O + SF_x \rightarrow SOF_{x-1} + F$) [20].

O segundo fenômeno ocorre quando uma grande quantidade de oxigênio é adicionada ao sistema. A quimiossorção de radicais de oxigênio na superfície do silício gera a formação de um filme inibidor Si_xO_yF_z, que protege o substrato do ataque de espécies reativas (figura 2.6).

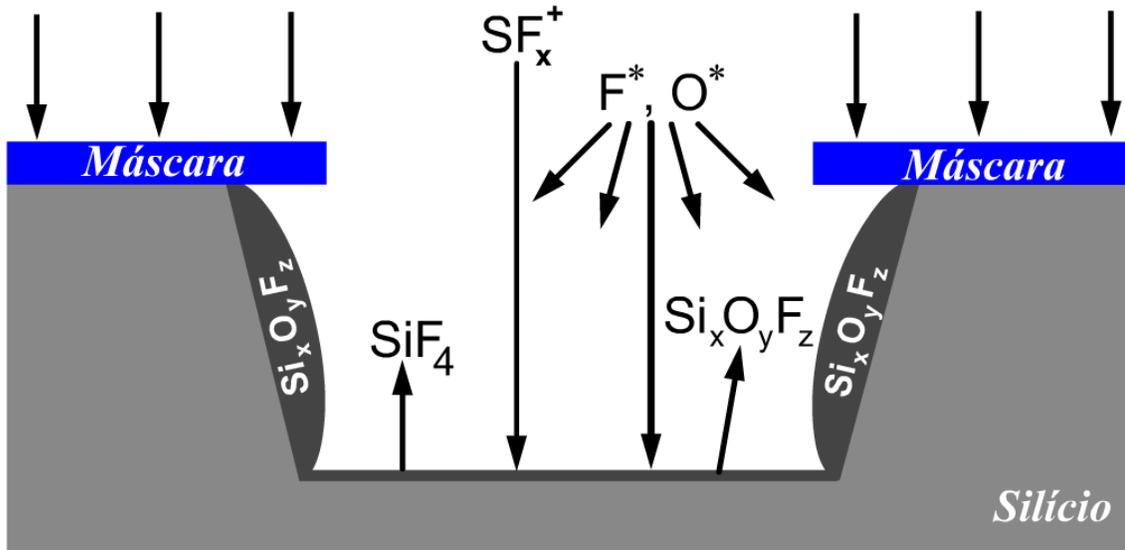


Figura 2.6. Diagrama do mecanismo de corrosão do silício em plasmas de SF₆ e O₂ [21].

Em síntese, observa-se um crescimento da taxa de corrosão do silício com a adição de uma pequena quantidade de oxigênio na mistura gasosa devido ao aumento da concentração de flúor atômico. No entanto, quando um grande fluxo de oxigênio é adicionado ao sistema, ocorre a formação do filme inibidor Si_xO_yF_z na superfície do silício, acarretando em uma diminuição em sua taxa de corrosão. Este modelo é conhecido como modelo de quimiossorção de histerese [20].

Na maioria dos casos deseja-se obter uma alta taxa de corrosão assim como um perfil com alto grau de anisotropia. No entanto, altas taxas de corrosão entram em conflito com perfil anisotrópico. A taxa de corrosão é proporcional à concentração de espécies reativas, que por sua vez é proporcional à pressão do gás no interior da câmara. Altas pressões resultam em um maior número

de colisões entre os íons e as moléculas do gás, reduzindo o caminho livre médio entre eles, e, conseqüentemente, a energia de bombardeamento dos íons.

Outro problema encontrado é a densidade de defeitos gerados no substrato relacionado à alta taxa de corrosão e anisotropia. Os íons adquirem energia cinética através do campo elétrico da bainha. A alta energia cinética do bombardeamento de íons faz com que aumente a taxa de corrosão, provocando, todavia, um maior número de defeitos na superfície da amostra, além de diminuir a seletividade entre máscara e substrato [12].

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A realização deste trabalho demandou a utilização de vários tipos de recursos laboratoriais e instrumentais. Por esta razão, além do Laboratório de Plasma onde foram feitas as corrosões do silício, utilizou-se também o Laboratório do Centro de Componentes Semicondutores (CCS) para os processos de limpeza, oxidação, fotolitografia e microscopia óptica e o Laboratório de Óptica do Instituto de Física Gleb Wataghin para realização de microscopia eletrônica. Na figura 3.1 temos uma seqüência, a mais geral, de fabricação de ponteiros desenvolvidas no laboratório de Plasma e a seguir o detalhamento de cada uma das etapas.

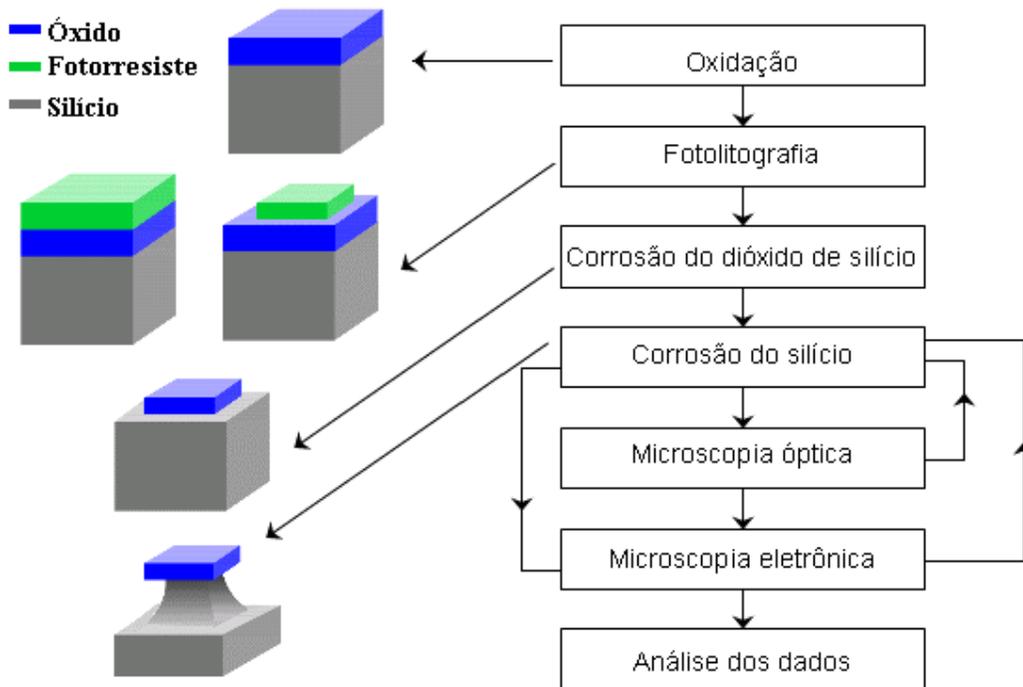


Figura 3.1. Seqüência geral das etapas de fabricação das microponteiras de silício.

3.1 Preparação das Amostras

As amostras utilizadas no presente trabalho já se encontravam previamente preparadas para a corrosão do silício por plasma de RF. O processo de preparação das amostras, estabelecido no Laboratório de Plasma, é constituído das etapas de oxidação, limpeza e fotolitografia, realizadas no Centro de Componentes Semicondutores (CCS) utilizando condições e processos pré-estabelecidos, sendo que a etapa de corrosão do filme de dióxido de silício por plasma RIE, foi realizada no Laboratório de Plasma.

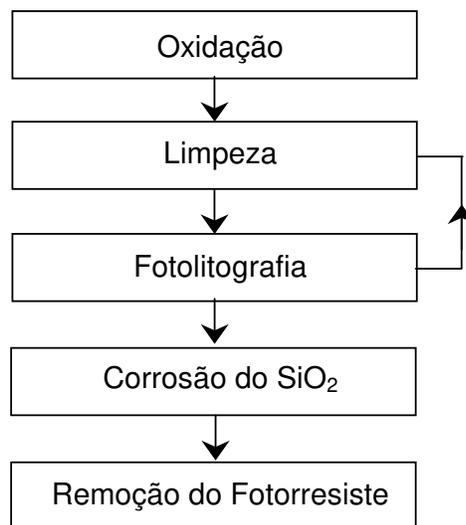


Figura 3.2. Seqüências das etapas de preparação das amostras.

3.1.1 Oxidação

Para se obter a camada de dióxido de silício de 3000 Å necessária para a confecção de microponteiras, as lâminas foram oxidadas a uma temperatura de 1000°C, expostas aos seguintes fluxos e tempos:

- a) 10 minutos em N₂.
- b) 10 minutos em O₂.
- c) 30 minutos em O₂ + H₂O em fase vapor.
- d) 10 minutos em N₂.

A espessura da camada de dióxido de silício obtida, medida pelo elipsômetro, foi de aproximadamente 3240 Å.

3.1.2 Limpeza

Inicialmente, não foi aplicado o processo de limpeza em nossa lâmina por se tratar de uma lâmina retirada, no momento da oxidação, de uma embalagem a vácuo sem a contaminação pelo ambiente.

A limpeza realizada antes da aplicação do fotorresiste durante o processo de fotolitografia possibilita uma maior aderência entre o fotorresiste e o filme de dióxido de silício. A limpeza também é utilizada para remover o fotorresiste

remanescente na amostra quando o processo de fotolitografia apresenta resultados não satisfatórios, sendo necessário, portanto, repeti-lo.

3.1.3 Processo Fotolitográfico

As estruturas utilizadas neste trabalho foram fotolitografadas utilizando o processo estabelecido no CCS (ver figura 3.3), sendo que a máscara utilizada no presente trabalho envolve geometrias quadradas de diferentes dimensões.

O processo padrão de fotolitografia por contato é constituído da etapa de deposição de fotorresiste no *spinner*, exposição da amostra em contato com a máscara à luz ultravioleta (foto-alinhadora Karl Suss) e revelação das estruturas através da imersão em uma solução contendo água DI e revelador (ver figura 3.3).

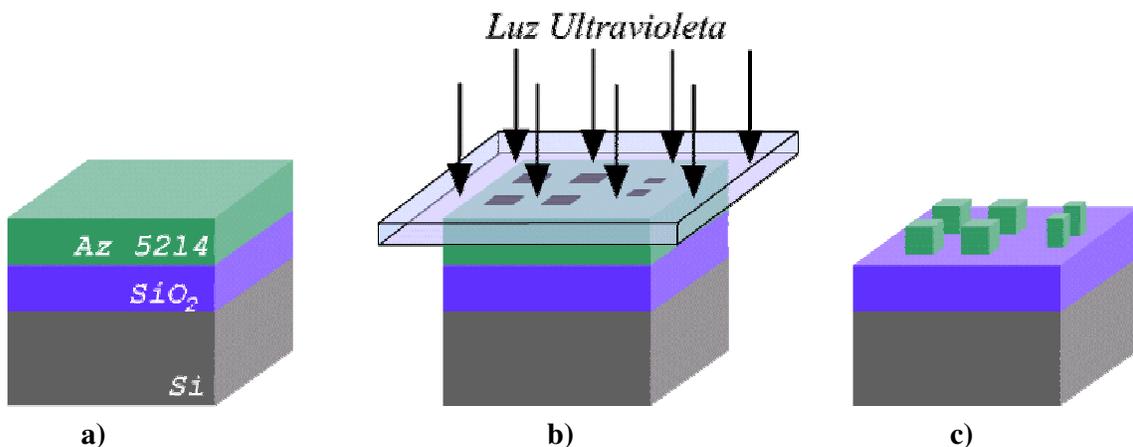


Figura 3.3. Etapas seqüenciais da fotolitografia: a) lâmina oxidada após a aplicação do resiste; b) exposição por contato à radiação UV; c) padrões geométricos definidos após a revelação.

3.1.4 Corrosão do Filme de Dióxido de Silício por Plasma de CF_4

A corrosão do filme de dióxido de silício foi realizada no Laboratório de Plasma. O gás precursor utilizado neste processo foi o tetrafluorometano (CF_4), freqüentemente utilizado para a corrosão deste filme [11, 22]. Após o processo de corrosão do filme de SiO_2 o fotorresiste remanescente é removido utilizando-se acetona em temperatura ambiente, finalizando assim o processo de preparação inicial das amostras.

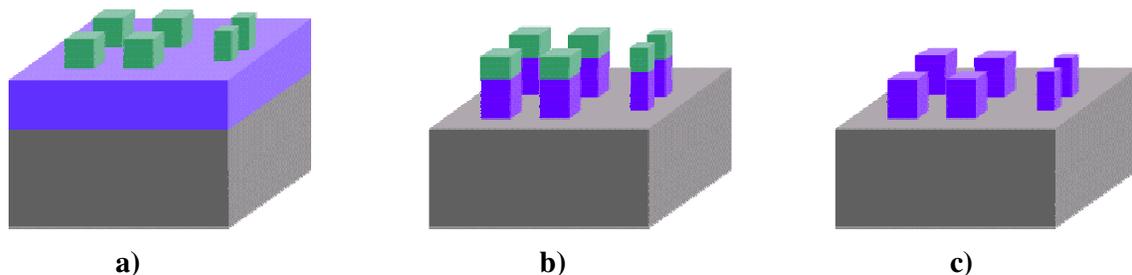


Figura 3.4. Etapas seqüenciais da remoção de SiO_2 : a) lâmina após o processo de fotolitografia; b) corrosão do dióxido de silício por plasma de CF_4 ; c) lâmina após remoção do fotorresiste através da imersão em acetona.

3.2 Características Experimentais dos Processos Executados neste Trabalho

Com as amostras recebidas já pré-preparadas, iniciamos o processo principal de nosso trabalho, a corrosão do silício a partir de plasma de RF para a fabricação de microponteiras. O controle de parâmetros deste processo (composição

gasosa, potência de RF, tempo, etc.) influencia diretamente nas características mecânicas, geométricas e elétricas finais do dispositivo a ser fabricado.

Além da descrição do sistema utilizado para o processo de corrosão, descreveremos sucintamente as medidas utilizadas para estudar suas características básicas tais como taxa de corrosão, anisotropia, seletividade e qualidade da superfície, visando obter um maior controle e compreensão do processo.

3.2.1 Descrição do Sistema de Corrosão Utilizado

A corrosão das amostras foi realizada no reator de placas paralelas representado na figura 3.5. A câmara de reações (1) projetada e fabricada em aço inoxidável possui diâmetro de 300 mm e altura de 140mm, onde se situam dois eletrodos horizontais e paralelos de 90mm diâmetro (2) e (3).

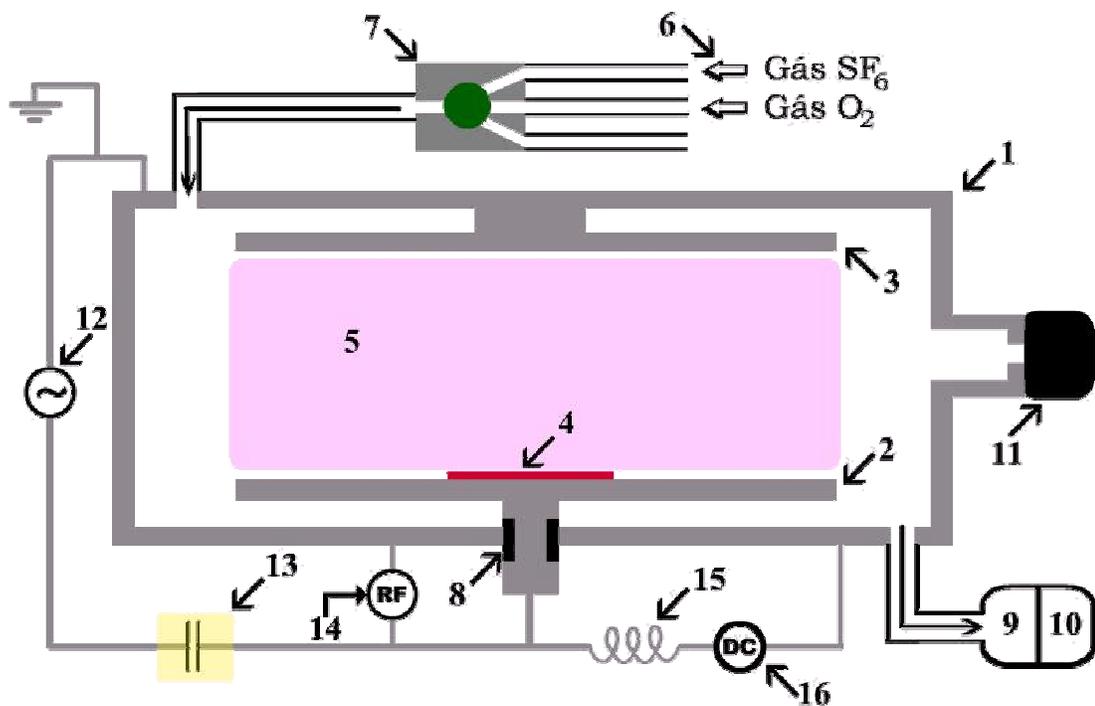


Figura 3.5. Esquema do sistema experimental de corrosão.

O eletrodo inferior (2) é isolado eletricamente (8) do corpo da câmara e do eletrodo superior (3), que se encontram aterrados.

O gerador de RF ENI OEM-1250 (12) que opera na frequência fixa de 13,56 MHz é acoplado capacitivamente ao eletrodo inferior (2) através de um circuito responsável pelo casamento de impedâncias ENI MW-25D-04/ 13,56 MHz (13). O sinal proveniente do gerador é aplicado aos eletrodos e resulta na ionização do gás injetado na câmara através de uma válvula tipo agulha (6), cujo fluxo é controlado pelo medidor de fluxo de massa MKS-Type 247 (7).

O sistema de vácuo é composto de uma bomba mecânica Trivac D16 BCS-Leybold (9) e uma bomba turbomolecular Turbovac 151C-Leybold (10). O valor da pressão no interior da câmara é medido através do sensor CM10-Leybold (11).

O valor da potência de RF é medido através de um wattímetro (14) e o valor da tensão DC de autopolarização através de um voltímetro (16) conectado ao eletrodo inferior por um indutor (15) que não permite a passagem de sinal de alta frequência (atua como um filtro Passa-Baixas).

A câmara dispõe de janelas de quartzo para o controle visual do processo, verificação da ionização do gás, e podem ser utilizadas para análise espectral do plasma (*espectroscopia de emissão óptica*).

3.2.2.1 Taxa de Corrosão do Silício

Durante um período de tempo, t , o valor da taxa de corrosão do silício¹, T , é calculado através da equação 3.1 (onde h é a profundidade da corrosão):

$$T = \frac{h}{t} \quad (3.1)$$

¹ Quando citada sem especificação em relação à direção, a taxa de corrosão do silício refere-se à taxa de corrosão na direção vertical, ou perpendicular à superfície da amostra.

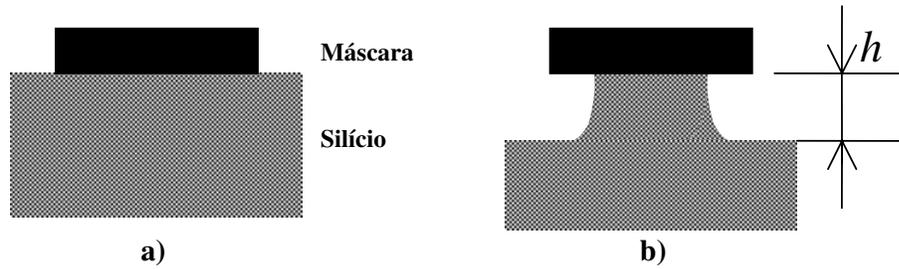


Figura 3.6. a) amostra antes do processo; b) amostra após o processo de corrosão.

3.2.2.2 Anisotropia

A representação numérica da variação geométrica do perfil do dispositivo é definida pela razão de aspecto, RA , ou, da anisotropia, A . A razão de aspecto é a razão entre a taxa de corrosão na direção vertical, T_z (eixo-z), pela taxa de corrosão na direção paralela à superfície da amostra, T_x (eixo-x), (equação 3.2).

$$RA = \frac{T_z}{T_x} = \frac{h/t}{x/t} = \frac{h}{x} \quad (3.2)$$

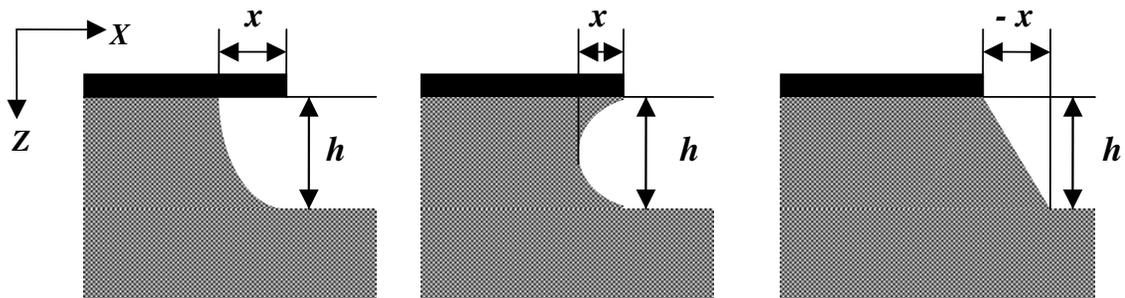


Figura 3.7. Definição de razão de aspecto e anisotropia. O parâmetro h representa a profundidade da corrosão e x representa a corrosão máxima paralela à superfície, ou a extensão lateral máxima no caso de perfil $A > 1$ [19].

A anisotropia é representada numericamente através da equação 3.3 [19]. O perfil totalmente isotrópico ($A=0$) é obtido na condição em que $x=h$, significando que a taxa de corrosão do silício é igual em todas as direções. O perfil totalmente anisotrópico ($A=1$) é alcançado somente quando $x=0$, representando assim uma taxa de corrosão paralela à superfície da amostra (eixo-x) igual à zero.

$$A = 1 - \frac{1}{RA} = 1 - \frac{x}{h} \quad (3.3)$$

3.2.2.3 Seletividade

A seletividade, S , é a razão entre as taxas de corrosão verticais de distintos materiais em um plasma e é definida pela equação 3.4.

$$S = \frac{T_1}{T_2} \quad (3.4)$$

Onde T_1 é a taxa de corrosão do material a ser corroído e T_2 é a taxa de corrosão de outro material presente no sistema (material de máscara, subjacente ou de mesmo nível).

3.2.2.4 Fluxo de Gases

Um dos parâmetros mais importantes no processo de corrosão é a composição e o fluxo das espécies gasosas dentro da câmara. O seu controle influencia diretamente nas principais características da corrosão e é realizado pelo medidor de fluxo de massa MKS-Type 247, que utiliza como unidade de medida o $sccm^2$.

Para a obtenção da porcentagem individual de cada espécie gasosa presente no sistema é necessário utilizar a equação 3.5.

$$F_{G\alpha} (\%) = \frac{F_{G\alpha} (sccm)}{\sum_{n=1}^m F_{G_n} (sccm)} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde $F_{G\alpha}$ é o fluxo (em % ou sccm) da espécie gasosa α^3 e m é número total de espécies gasosas diferentes que compõe o gás ($\leq \alpha \leq m$).

² O valor de 1 sccm (*standard cubic centimeters per minute*) corresponde a 1 cm³ de gás a pressão de 1 atm e temperatura igual a 25°C. [12].

³ α é um valor numérico correspondente a uma espécie química, por exemplo: $\alpha=1 \rightarrow O_2$; $\alpha=2 \rightarrow SF_6$.

3.3 Técnicas de Análise

As técnicas de análise utilizadas tiveram a finalidade de caracterizar as grandezas do processo tais como taxa de corrosão, anisotropia e seletividade.

A técnica mecânica de perfilometria é a mais apropriada para medir espessuras corroídas. Além de determinar a profundidade da corrosão pela mudança de altura nos degraus criados pelo processo de corrosão, ela pode ser utilizada para determinar a taxa de corrosão. Para isto, é necessário dividir a espessura corroída pelo tempo da corrosão. A perfilometria foi realizada no CCS e no IFGW utilizando-se o perfilômetro DEKTAK

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (*SEM – Scanning Electronic Microscopy*) foi realizada no Laboratório de Óptica do IFGW utilizando o microscópio JEOL JSM-5410. Esta técnica proporciona uma grande quantidade informações em relação à análise de perfil, anisotropia, rugosidade da superfície e uniformidade. As análises das imagens obtidas foram feitas através do software SEMAFORE, que facilita a extração de medidas das estruturas.

3.4 Cálculo do Tempo de Corrosão para Dimensionamento das Ponteiros

Para o dimensionamento final da ponta do dispositivo, alguns parâmetros como anisotropia, taxa de corrosão e dimensão da máscara devem ser considerados. A seguir fazemos uma análise considerando que todos os parâmetros possuem valores constantes durante o decorrer do processo.

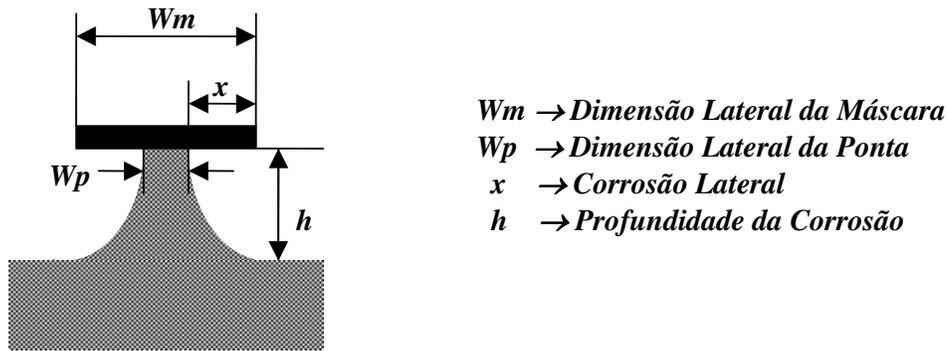


Figura 3.8. Definição de parâmetros para cálculo da dimensão da ponteira.

A partir da figura 3.8 faz-se a análise para obtenção de W_p :

$$W_p = W_m - 2 \cdot x \quad (3.6)$$

$$\frac{W_p}{2} = \frac{W_m}{2} - \left[t \cdot \frac{h}{t} \cdot \left(\frac{x}{h} \right) \right] \quad (3.7)$$

Substituindo as equações (3.1) e (3.3) em (3.7) obtemos:

$$\frac{W_p}{2} = \frac{W_m}{2} - [t \cdot T \cdot (1 - A)] \quad (3.8)$$

Portanto, para a obtenção de uma ponteira com dimensão W_p , o tempo de corrosão necessário, t , é igual a:

$$t = \frac{W_m - W_p}{2 \cdot T \cdot (1 - A)} \quad (3.9)$$

A equação 3.9 é utilizada apenas para uma estimativa inicial, uma vez que os parâmetros envolvidos sofrem variações significativas durante o processo. A taxa de corrosão, por exemplo, varia devido à instabilidade da temperatura e ao efeito de carga [12], e a anisotropia, varia com o decorrer do processo.

3.5 Realização das Experiências com Variações de Parâmetros do Plasma

Todas as experiências apresentadas nesta seção foram realizadas no sistema da figura 3.5. Nas experiências 1,2 e 4 foram utilizadas amostras de silício tipo p <100>, com padrões de mascaramento quadrados de dióxido de silício com dimensão lateral de 6 μ m. Na experiência 3 foram utilizadas amostras de dióxido de silício constituídas de uma rede de difração com frequência espacial de 100 μ m, utilizando fotorresiste como máscara. A utilização de amostras com geometrias de maiores dimensões tem o intuito de facilitar o diagnóstico do processo de corrosão do dióxido de silício através da técnica de perfilometria.

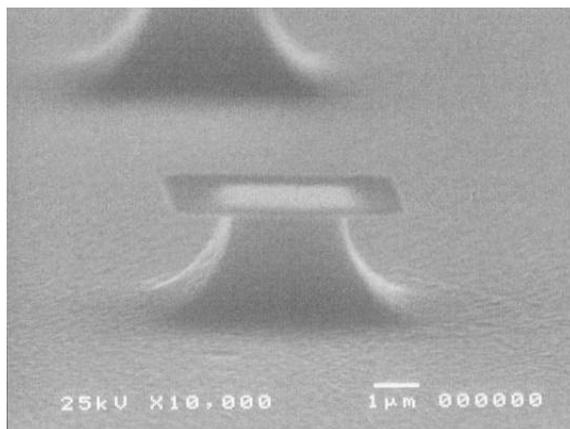
Imediatamente após as amostras terem sido alojadas na ponta de um pinça, aplicou-se um rápido mergulho em solução aquosa de HF altamente diluída (proporção volumétrica de 1:100), seguida de uma secagem em fluxo de nitrogênio. O objetivo deste mergulho é a remoção da fina camada de óxido nativo que surge na superfície do silício. Após esta etapa a amostra é colocada imediatamente no interior da câmara.

3.5.1 Experiência 1: Corrosão do Silício com variação do Fluxo de Hexafluoreto de Enxofre

Nesta experiência, para uma potencia de 50W, variamos o fluxo de hexafluoreto de enxofre entre 25 e 40 sccm, sem nenhuma adição de outra espécie gasosa. O período do processo de corrosão foi de 20 minutos.

O objetivo principal desta experiência é analisar o comportamento do plasma constituído puramente de hexafluoreto de enxofre, que gera flúor atômico em grandes quantidades. O resultado pode ser analisado comparativamente com o de outras experiências, sendo este adotado como um padrão inicial.

3.5.1.1 Resultados da Experiência 1



Fluxo de SF₆= 25 sccm
Tempo = 20 min.
DC Bias= - 20 V.
Pressão (RF desligado) = 0,015 mbar
Pressão (RF ligado) = 0,06 mbar
 $T_{Si}=0,12 \mu\text{m} / \text{min}$
Anisotropia $\cong 0,6$

Figura 3.9. Corrosão com 25 sccm de SF₆.

Tabela 3.1. Perfil obtido após 20 minutos de corrosão com as respectivas condições.

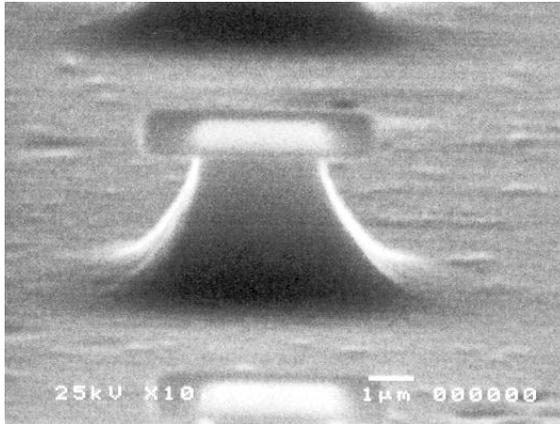


Figura 3.10. Corrosão com 30 sccm de SF₆.

Fluxo de SF₆= 30 sccm
 Tempo = 20 min.
 DC Bias= - 19 V.
 Pressão (RF desligado) = 0,018 mbar
 Pressão (RF ligado) = 0,06 mbar
 T_{Si} = 0,16 µm /min
 Anisotropia ≅ 0,6

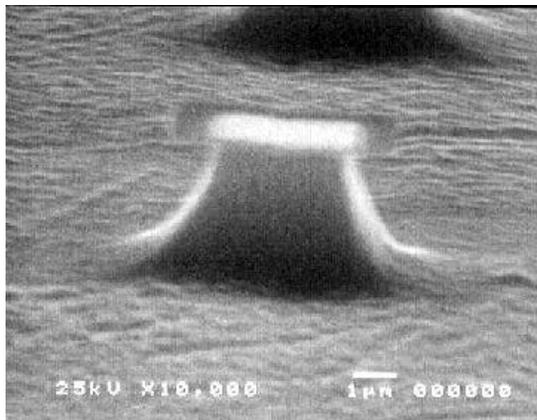


Figura 3.11. Corrosão com 40 sccm de SF₆.

Fluxo de SF₆= 40 sccm
 Tempo = 20 min.
 DC Bias= - 16 V.
 Pressão (RF desligado) = 0,025 mbar
 Pressão (RF ligado) = 0,07 mbar
 T_{Si} = 0,17 µm /min
 Anisotropia ≅ 0,6

Tabela 3.1. Perfil obtido após 20 minutos de corrosão com as respectivas condições.

Fluxo de SF₆ [sccm]	25	30	40
DC Bias [V]	-20	-19	-16
T_{Si} [µm/min]	0,12	0,16	0,17
Anisotropia	0,6	0,6	0,6

Tabela 3.2. Resumo dos resultados obtidos após 20 minutos de corrosão.

3.5.1.2 Análise dos Resultados da Experiência 1

Normalmente ao submetermos um substrato a um bombardeamento de íons, este provoca defeitos estruturais na superfície do substrato. Em nossa experiência, a ausência de defeitos na superfície do substrato está diretamente associada à baixa potência de 50W, o que resulta em uma tensão de autopolarização de -19 à -16 Volts. Outro fator responsável pela qualidade da superfície é a ausência de um gás que forma um filme inibidor (oxigênio, por exemplo), que na maioria das vezes forma produtos na superfície do substrato que agem como micromáscaras, aumentando a rugosidade da superfície [23,24]. As pequenas variações na topografia da superfície da amostra devem ser causadas provavelmente, por resíduos ou contaminantes presentes na superfície da mesma antes do processo de corrosão.

Apesar da corrosão por plasma de SF₆ ser considerada predominantemente química, a altura da estrutura, 3,35 μm, elimina a possibilidade de uma corrosão estritamente química, cujo resultado é uma morfologia isotrópica. A altura máxima de uma microponteira em uma corrosão isotrópica deve ser obrigatoriamente menor que metade da dimensão lateral da máscara (3 μm no caso), pois a corrosão dar-se-ia na mesma velocidade em todas as direções resultando em um deslocamento da máscara. Observa-se, portanto, uma concordância entre o resultado obtido (pedestais com alturas maiores que 3μm – figuras 3.9-3.11) e o efeito sinérgico (apresentado no cap. 2, subseção 2.3.1),

onde a corrosão desenvolveu-se de forma direcional (apesar da pouca influência no perfil) utilizando ambos os mecanismos físicos e químicos.

O valor da tensão de autopolarização sofreu uma pequena redução (em módulo) com o aumento do fluxo de SF₆, tendo em vista o fato de que o hexafluoreto de enxofre é um gás altamente eletronegativo [19]. Conseqüentemente, com o aumento do fluxo de SF₆ no interior da câmara há uma diminuição do potencial do plasma.

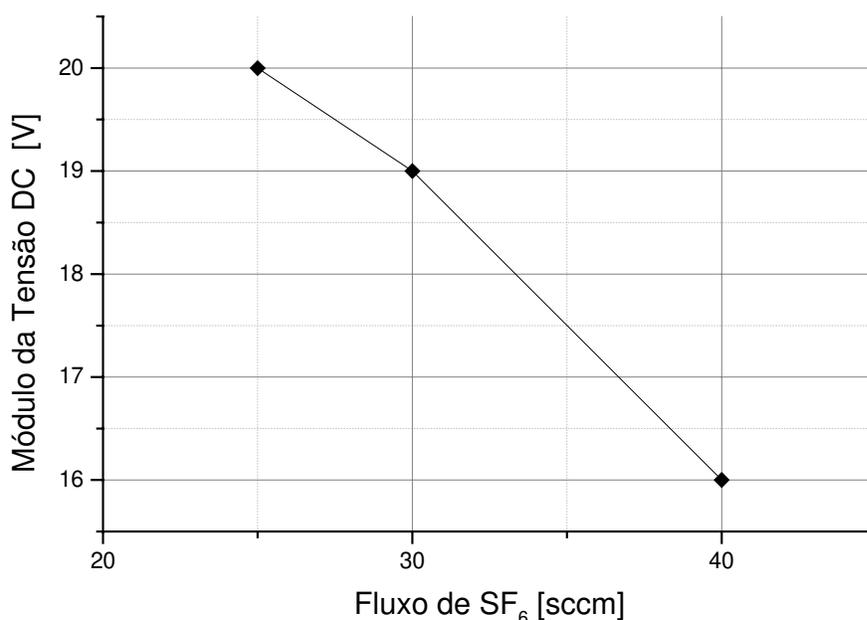


Figura 3.12 Gráfico do módulo da tensão DC de autopolarização em função do fluxo de SF₆.

A alta afinidade em atrair elétrons é baseada principalmente em dois tipos de reações [25]: reações associativas ($\text{SF}_6 + e^- \rightarrow \text{SF}_6^-$) e reações associativas com dissociação de moléculas ($\text{SF}_6 + e^- \rightarrow \text{SF}_5^- + \text{F}$). Estas reações associativas anexam elétrons com energias relativamente altas (até 4 a 7 eV), enquanto as

reações de dissociação geram elétrons com energias menores. Ocorre então que a partir desse sistema de reações cíclicas (associação e dissociação) observa-se uma perda de energia de elétrons no volume do plasma [25]. Além disso, um aumento na pressão da câmara faz com que o caminho livre médio dos elétrons diminua, aumentando conseqüentemente a perda da energia destes elétrons por meio de colisões.

3.5.2 Experiência 2: Corrosão do Silício com Variação de Fluxos de Hexafluoreto de Enxofre e Oxigênio na Mistura Gasosa

Nesta experiência, objetivando-se avaliar a taxa de corrosão e o grau de anisotropia do dispositivo, utilizamos amostras com as mesmas dimensões de mascaramento. O fluxo total dos gases combinados foi mantido constante em 40 sccm, resultando em uma pressão no interior da câmara de 0,025 mbar antes do acionamento da fonte de RF, no entanto, a variação percentual da concentração de oxigênio foi de 10%, 20%, 25%, 50% e 70%. Para a estabilização da pressão e da mistura gasosa, os gases foram inseridos no sistema cinco minutos antes da ativação da fonte de RF.

3.5.2.1 Apresentação dos Resultados da Experiência 2

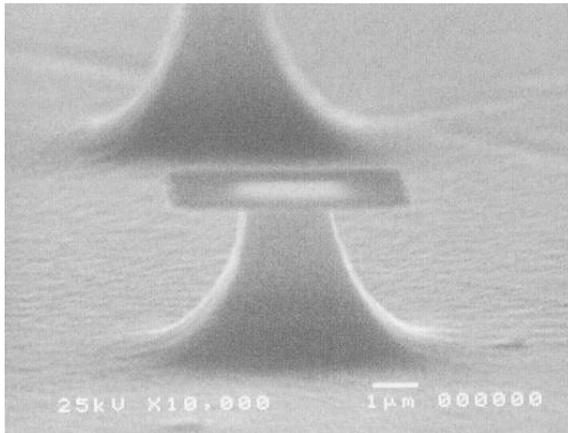


Figura 3.13 Corrosão com 10% de O₂.

Concentração de O₂ = 4 sccm (10%)
Concentração de SF₆ = 36 sccm (90%)
Tempo = 20 min.
DC Bias = - 16 V.
 $T_{Si} = 0,17 \mu\text{m} / \text{min}$
Anisotropia $\cong 0,6$

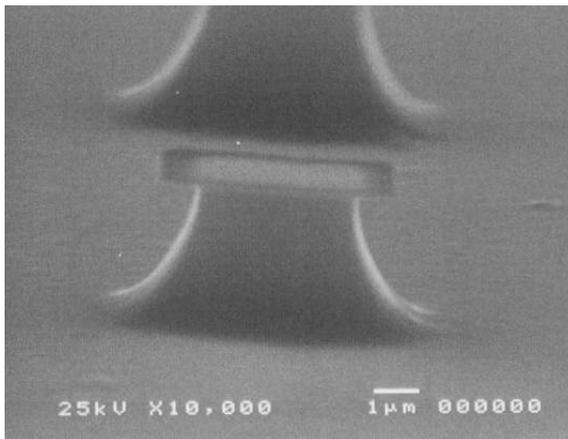


Figura 3.14 Corrosão com 20% de O₂.

Concentração de O₂ = 8 sccm (20%)
Concentração de SF₆ = 32 sccm (80%)
Tempo = 20 min.
DC Bias = - 16 V.
 $T_{Si} = 0,17 \mu\text{m} / \text{min}$
Anisotropia $\cong 0,8$

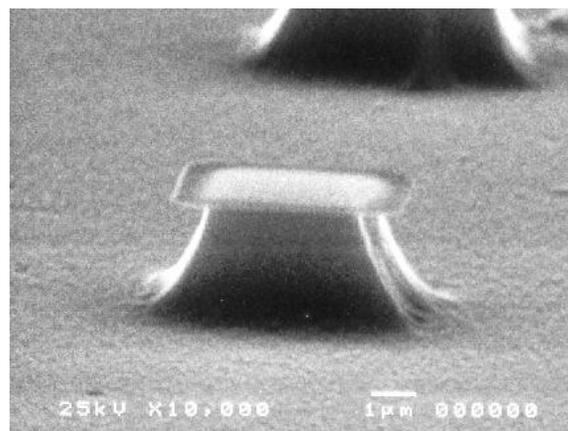


Figura 3.15 Corrosão com 25% de O₂.

Concentração de O₂ = 10 sccm (25%)
Concentração de SF₆ = 30 sccm (75%)
Tempo = 20 min.
DC Bias = - 17 V.
 $T_{Si} = 0,13 \mu\text{m} / \text{min}$
Anisotropia $\cong 0,7$

Tabela 3.3 Perfil obtido após 20 minutos de corrosão com as respectivas condições de concentração de oxigênio e dados obtidos a partir das figuras representativas.



Concentração de O_2 = 20 sccm (50%)

Concentração de SF_6 = 20 sccm (50%)

Tempo = 20 min.

DC Bias = - 18 V.

T_{Si} = 0,12 μm /min

Anisotropia \cong 0,5

Figura 3.16 Corrosão com 50% de O_2 .

Tabela 3.3. Perfil obtido após 20 minutos de corrosão com as respectivas condições de concentração de oxigênio e dados obtidos a partir das figuras representativas.

3.5.2.2 Análise dos Resultados da Experiência 2

Nas figuras de 3.13 a 3.16, podemos observar os perfis obtidos após 20 minutos de corrosão com as respectivas concentrações de oxigênio no volume da mistura gasosa, a qual foi mantida constante. A análise por microscopia eletrônica que as superfícies das amostras corroídas com concentração de oxigênio maior que 25% apresentaram um aumento na densidade de defeitos em sua superfície.

A dimensão lateral das máscaras, durante um mesmo período de corrosão, não apresenta diferenças significativas. As diferenças são provavelmente decorrentes de erros que podem ter ocorridos durante a etapa de obtenção de medidas com a utilização do software Semafore.

O gráfico da figura 3.17 mostra a variação da taxa de corrosão com o com a variação do fluxo de O_2 e SF_6 no plasma. A partir do gráfico é possível observar que em condições onde o fluxo de SF_6 é relativamente elevado e o fluxo de oxigênio é pequeno (36 sccm e 4 sccm, respectivamente, por exemplo - figura 3.13) há uma maior taxa de corrosão em relação a um maior fluxo de SF_6 (40 sccm, por exemplo). Esse fenômeno pode ser explicado analisando as reações de átomos de oxigênio com radicais provenientes da dissociação do hexafluoreto de enxofre no plasma ($O + SF_x \rightarrow SOF_x$), que evitam a recombinação desses radicais com átomos de flúor para a reformação da molécula de SF_6 através de reações do tipo $SF_x + F \rightarrow SF_{x+1}$ ($x=5 \rightarrow 1$) [19]. Portanto, uma fração de flúor atômico que anteriormente seria recombinada e não atuaria na corrosão do silício, permanece no sistema na forma de espécie reativa.

Para aumentos maiores de fluxo de O_2 e diminuição do fluxo de SF_6 (figuras 3.15 e 3.16), observa-se uma redução da taxa de corrosão a qual não pode se explicada pelo modelo acima.

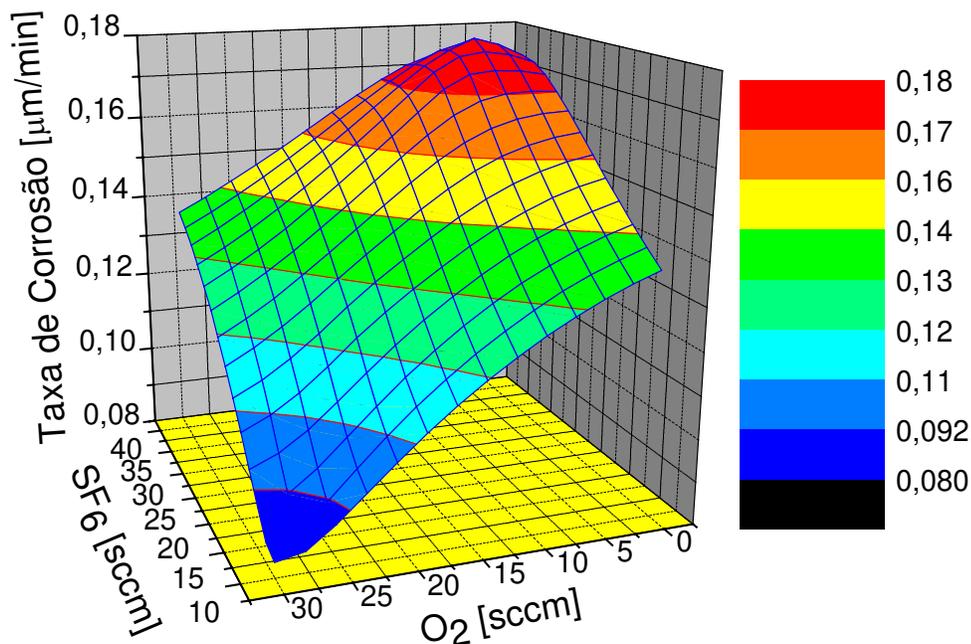


Figura 3.17. Gráfico de superfície representando a taxa de corrosão do silício em função da variação do fluxo de SF_6 e O_2 .

Na presença de um maior percentual de oxigênio no sistema, as espécies reativas de ambos os gases competem pela quimiossorção da superfície do silício. Conseqüentemente, átomos de flúor difundem-se com uma maior dificuldade no substrato, pois estes precisam remover átomos de oxigênio que se encontram na superfície para depois reagirem com o silício (figura 3.18).

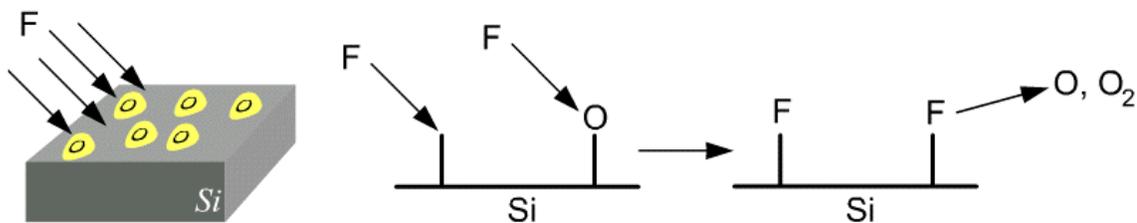


Figura 3.18. Esquema do mecanismo do ataque de átomos de flúor na presença de oxigênio. O processo de corrosão química depende da quimiossorção do flúor no silício exposto. Quando o oxigênio absorve na superfície, os átomos de flúor devem primeiramente atacar essa camada oxidada e remover o oxigênio para iniciar o processo de corrosão [12].

Além da diminuição da taxa de corrosão, os átomos de oxigênio assim como os subprodutos redepositados sobre o substrato são responsáveis pelo aumento da rugosidade da superfície. Estes produtos são absorvidos na superfície e passam a atuar como micromáscaras, criando uma grande quantidade de defeitos na forma de pirâmides ou gramas (*micrograss*) no caso de corrosões anisotrópicas [23]. Por este motivo, as corrosões com uma elevada concentração de oxigênio resultam em uma superfície rugosa.

A variação do valor da tensão de autopolarização em função da concentração de oxigênio é representada pelo gráfico da figura 3.19. O aumento da quantidade de oxigênio no interior da câmara implica na diminuição da concentração de hexafluoreto de enxofre, elevando conseqüentemente o valor da tensão de autopolarização, conforme visto anteriormente.

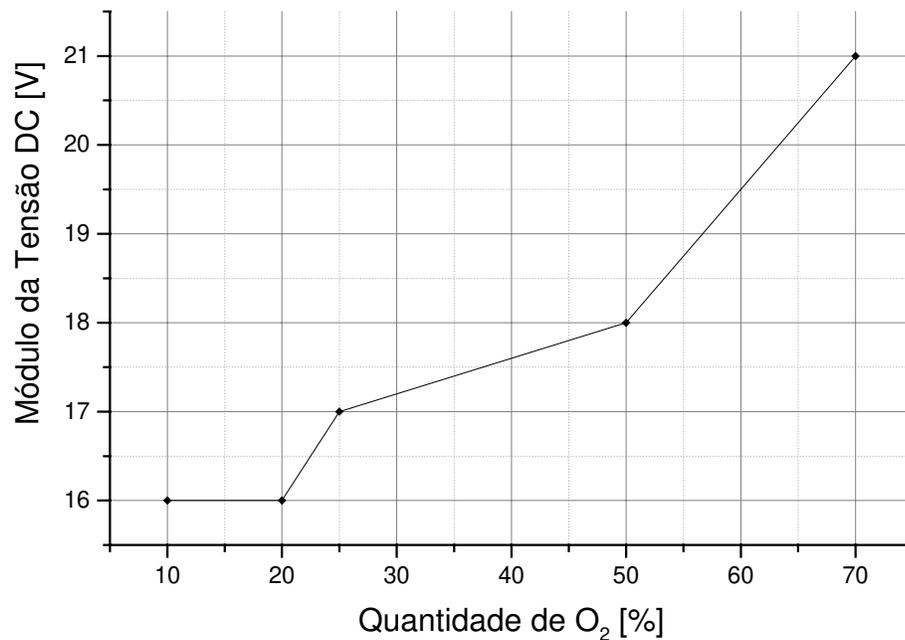


Figura 3.19. Gráfico do módulo da tensão de autopolarização em função da concentração de oxigênio no sistema.

Os pedestais cujo perfil possui uma maior anisotropia são os representados pelas figuras 3.14 e 3.15, com 20% e 25% de O_2 na mistura gasosa, respectivamente. Analisando o gráfico da figura 3.20 é possível observar que a área equivalente a 20% a 25% de O_2 é representada pelos intervalos de 30 a 32 sccm de SF_6 e 8 a 10 sccm de O_2 , e possui os valores mais elevados em relação à anisotropia.

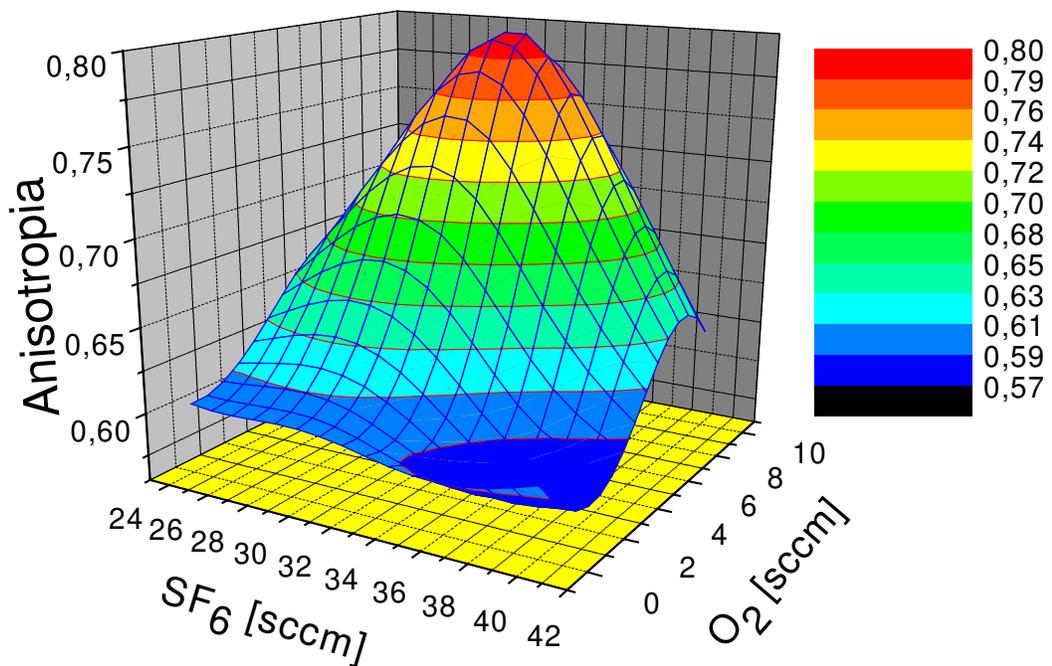


Figura 3.20. Gráfico de superfície representando os dados obtidos em nosso experimento com relação à anisotropia.

3.5.3 Experiência 3: Corrosão do Dióxido de Silício com Variação de Fluxos de Hexafluoreto de Enxofre e Oxigênio na Mistura Gasosa

O objetivo principal desta experiência é determinar a seletividade entre o filme de SiO_2 e o Si , visando calcular o tempo máximo de permanência das amostras no plasma sem que o filme de SiO_2 seja removido totalmente inviabilizando a continuidade do processo.

Escolhemos amostras com grandes dimensões visando facilitar as medidas a serem obtidas através da perfilometria. As condições do processo foram exatamente as mesmas utilizadas durante a realização da experiência anterior.

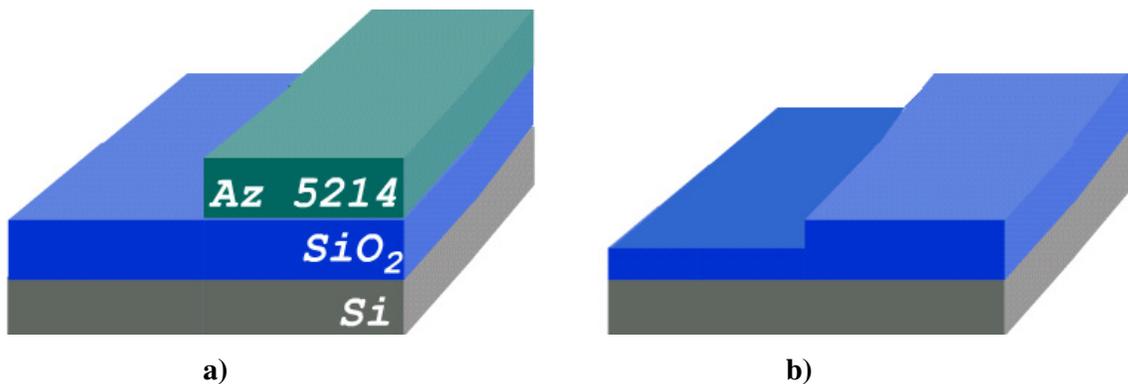


Figura 3.21. Corrosão do filme de SiO_2 : a) amostra utilizando o fotorresiste AZ5214 como máscara; b) amostra após a corrosão por plasma e remoção do fotorresiste utilizando acetona.

Após o processo de corrosão por plasma, o fotorresiste foi removido das amostras através da imersão destas em acetona. O valor da altura do degrau criado pela corrosão por plasma (figura 3.24b) foi obtido utilizando o perfilômetro DEKTAK do IFGW.

3.5.3.1 Resultados da Experiência 3

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Percentual O₂	10%	20%	25%	50%	70%
Fluxo SF₆	36 sccm	32 sccm	30 sccm	20 sccm	12 sccm
Fluxo O₂	4 sccm	8 sccm	10 sccm	20 sccm	28 sccm
Tempo	3 min.	10 min.	2 min.	3 min.	10 min.
Altura do Degrau	217 Å	735 Å	135 Å	153 Å	355 Å
Taxa de Corrosão SiO₂	72 Å/min.	73 Å/min.	67 Å/min.	51 Å/min.	35 Å/min.

Tabela 3.4. Taxa de corrosão do filme de SiO₂.

3.5.3.2 Análise dos Resultados da Experiência 3

Em corrosões com uma concentração elevada de oxigênio observa-se uma redução da taxa de corrosão do dióxido de silício (tabela 3.3). Variamos o tempo de corrosão uma vez que não era possível determinar através da técnica de perfilometria a dimensão do degrau. Estas amostras foram corroídas novamente, em um período maior do processo de corrosão (10 minutos).

O gráfico da figura 3.22 mostra a variação da taxa de corrosão em função da concentração de oxigênio com as mesmas concentrações gasosas utilizadas anteriormente.

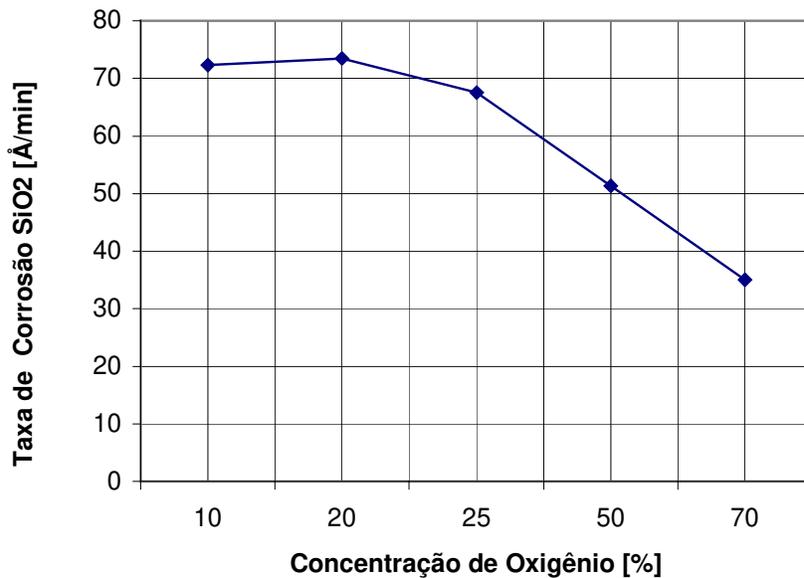


Figura 3.22. Gráfico da taxa de corrosão do dióxido de silício [Å/min] em função da concentração de oxigênio presente no sistema.

A curva representativa da variação da taxa de corrosão do filme de SiO₂ obteve um comportamento similar à curva da variação da taxa de corrosão do silício. Isto indica que o modelo de quimiossorção de histerese se aplica em ambos os materiais, como já foi verificado em trabalhos desenvolvidos por outros autores [10,19-20,22].

Com os valores das taxas de corrosão do silício e do dióxido de silício é possível calcular a seletividade entre esses dois materiais. A tabela 3.5 mostra a seletividade entre os materiais e tempo máximo de permanência das

amostras sem que a máscara seja totalmente removida (considerando a espessura do filme de SiO₂ igual a 3240 Å).

Percentual O₂	10%	20%	25%	50%	70%
Fluxo SF₆	36 sccm	32 sccm	30 sccm	20 sccm	12 sccm
Fluxo O₂	4 sccm	8 sccm	10 sccm	20 sccm	28 sccm
Taxa de Corrosão Si	1790 Å/min.	1730 Å/min.	1380 Å/min.	1240 Å/min.	840 Å/min.
Taxa de Corrosão SiO₂	72 Å	73 Å	67 Å	50 Å	35 Å
Seletividade	24	23	20	24	23
Tempo Limite	45 min.	44 min.	48 min.	63 min.	91 min.

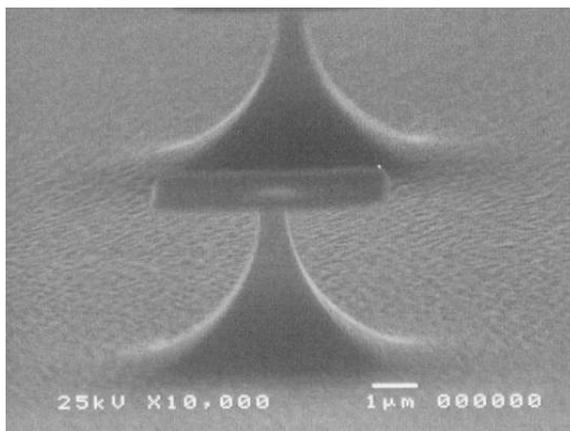
Tabela 3.5. Tabela mostrando a seletividade entre o silício e o dióxido de silício.

3.5.4 Corrosão do Silício para Fabricação de Microponteiras

O processo foi executado com os parâmetros escolhidos, a partir das experiências realizadas, durante um período de corrosão de 40 minutos; dentro do tempo previsto para que a máscara de SiO_2 não fosse totalmente removida pela ação do plasma de SF_6 .

O processo também foi realizado com uma concentração de 10 e 30% de oxigênio para análise tanto da anisotropia como principalmente da remoção do filme de dióxido de silício (no caso de concentração igual a 30% de oxigênio).

3.5.4.1 Apresentação dos Resultados da Experiência 4



Concentração de $\text{O}_2 = 4$ sccm (10%)
Concentração de $\text{SF}_6 = 36$ sccm (90%)
Tempo = 26 min. (20+6)
DC Bias= - 16 V.
 $T_{\text{Si}} = 0,15 \mu\text{m} / \text{min}$
Anisotropia $\cong 0,4$
Obs.: Etapa seqüencial a Figura 3.14

Figura 3.23. Corrosão com 10% de O_2 .

Tabela 3.6. Perfil das microponteiras de silício após o processo de corrosão.

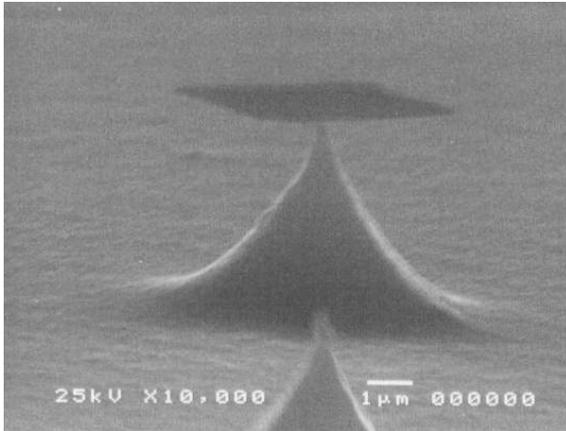


Figura 3.24. Corrosão com 20% de O₂.

Concentração de O₂ = 8 sccm (20%)
 Concentração de SF₆ = 32 sccm (80%)
 Tempo = 40 min. (20 + 20)
 DC Bias = - 16 V.
 T_{Si} = 0,12 µm /min
 Anisotropia = 0,5
 Obs.: Etapa seqüencial a Figura 3.15

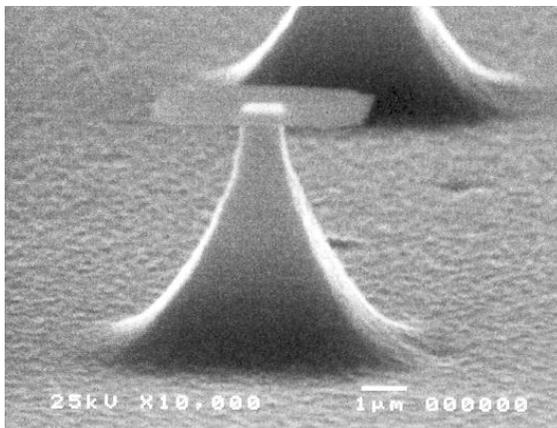


Figura 3.25. Corrosão com 25% de O₂.

Concentração de O₂ = 10 sccm (25%)
 Concentração de SF₆ = 30 sccm (75%)
 Tempo = 40 min. (20+20)
 DC Bias = - 17 V.
 T_{Si} = 0,13 µm /min
 Anisotropia = 0,6
 Obs.: Etapa seqüencial a Figura 3.16

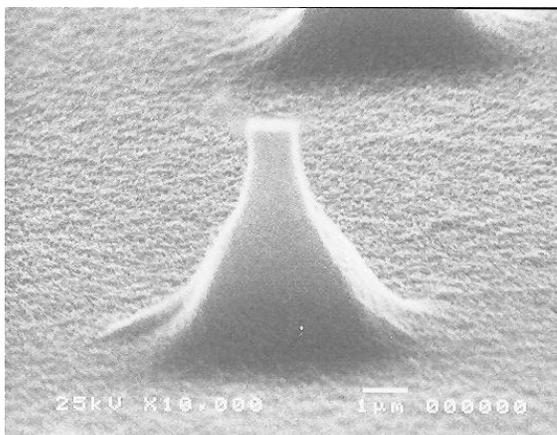
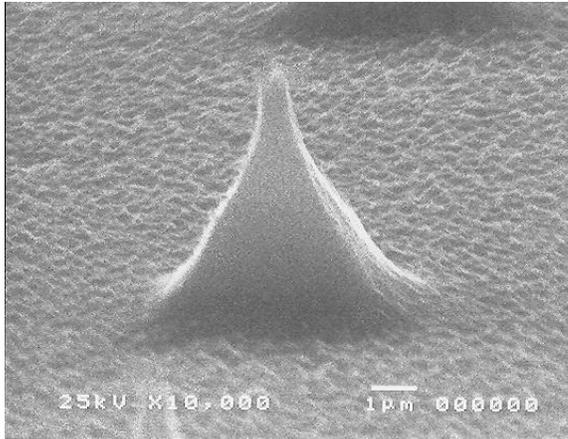


Figura 3.26. Corrosão com 30% de O₂.

Concentração de O₂ = 12 sccm (30%)
 Concentração de SF₆ = 28 sccm (70%)
 Tempo = 60 min.
 DC Bias = - 17 → -18 V.
 T_{Si} = 0,09 µm /min
 Anisotropia = 0,6

Tabela 3.6. Perfil das microponteiras de silício após o processo de corrosão.



Concentração de O_2 = 12 sccm (30%)
Concentração de SF_6 = 28 sccm (70%)
Tempo = 70 min. (60+10)
DC Bias = - 17 → -18 V.
 T_{Si} = 0,07 μ m /min
Anisotropia = 0,6
Obs.: Etapa seqüencial a Figura 3.29

Figura 3.27. Corrosão com 30% de O_2 .

Tabela 3.6. Perfil das microponteiras de silício após o processo de corrosão.

3.5.4.2 Análise dos Resultados da Experiência 4

As amostras utilizadas nesta experiência são as mesmas amostras utilizadas durante a realização da experiência 2, sendo novamente expostas ao plasma por um período adicional de tempo (com exceção da amostra vista nas figuras 3.26 e 3.27 que foi utilizada apenas nesta experiência). Os dados obtidos das figuras 3.13, 3.14 e 3.15 e das figuras 3.23, 3.24 e 3.25 foram analisados juntamente, uma vez que se tratam das mesmas amostras submetidas às mesmas condições de processo da experiência 2.

O tempo necessário do processo para a fabricação do dispositivo foi menor do que o esperado pela equação 3.9 (apêndice 1). O processo de corrosão foi o suficiente para que as máscaras permanecessem sobre as estruturas, embora as figuras 3.26 e 3.27 mostrem as máscaras com a dimensão lateral extremamente

reduzida. Uma acentuada rugosidade foi observada na superfície das estruturas corroídas com 30% de oxigênio, sendo que as demais apresentam uma superfície quase isenta de defeitos macroscópicos.

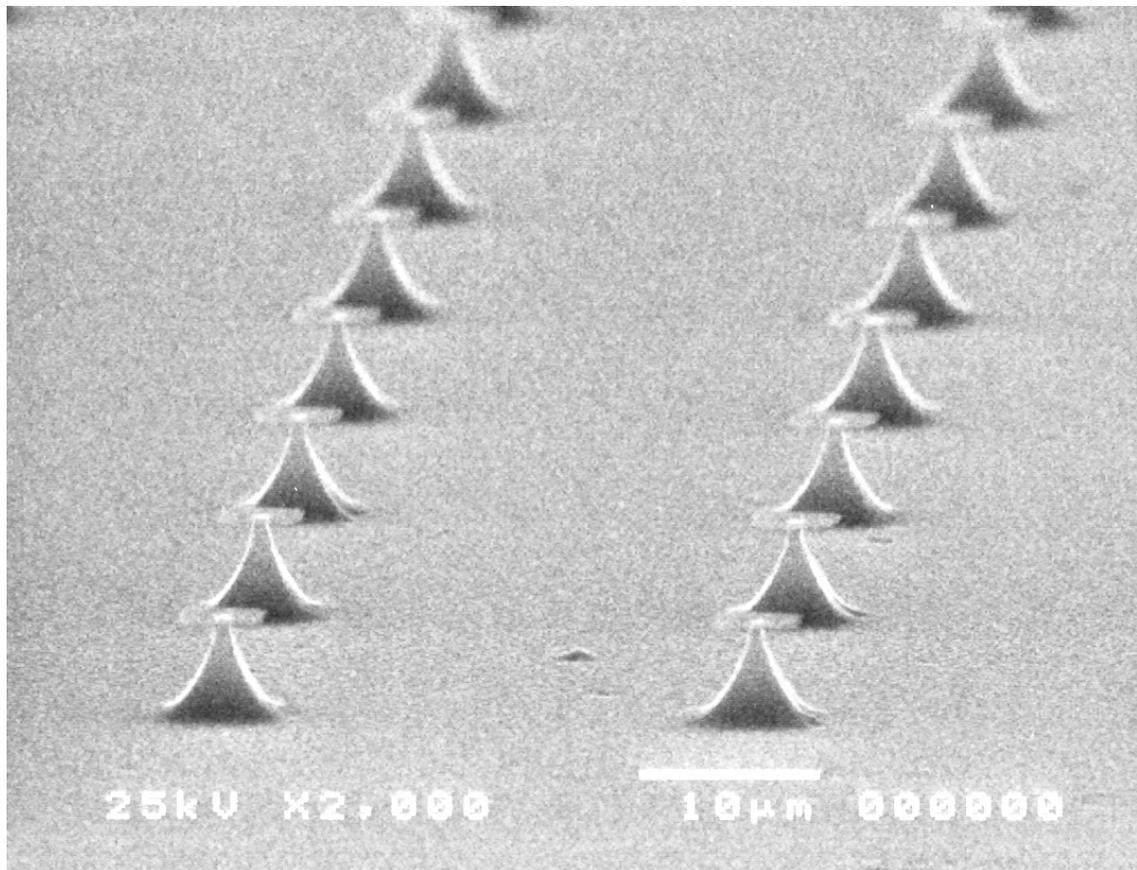


Figura 3.28. Microponteiros corroídos com 25% de oxigênio. Observa-se uma ótima uniformidade das estruturas e excelente qualidade de superfície.

Nesta experiência os tempos de processo foram limitados tanto pela corrosão do silício (figuras 3.23 a 3.25) quanto pela corrosão do dióxido de silício (figuras 3.26 e 3.27). Os tempos de corrosão do silício obtidos através da equação 3.9 (ver apêndice 1) foram baseados nos dados experimentais da experiência 2,

todavia esses tempos divergem do tempo real utilizado, uma vez que a taxa de corrosão e a anisotropia não apresentam um comportamento linear durante o decorrer do processo.

O gráfico apresentado na figura 3.29, resultado do experimento realizado em [26] utilizando CF_4 , demonstra o aumento da profundidade da corrosão em função do aumento da área exposta do substrato. Este efeito, chamado de efeito de carga (*loading effect*), é característica típica de gases fluorados (onde a corrosão química e isotrópica é predominante) [12] enquanto que gases que possuem uma componente de corrosão anisotrópica (gases clorados, por exemplo) exibem um pequeno efeito de carga [27].

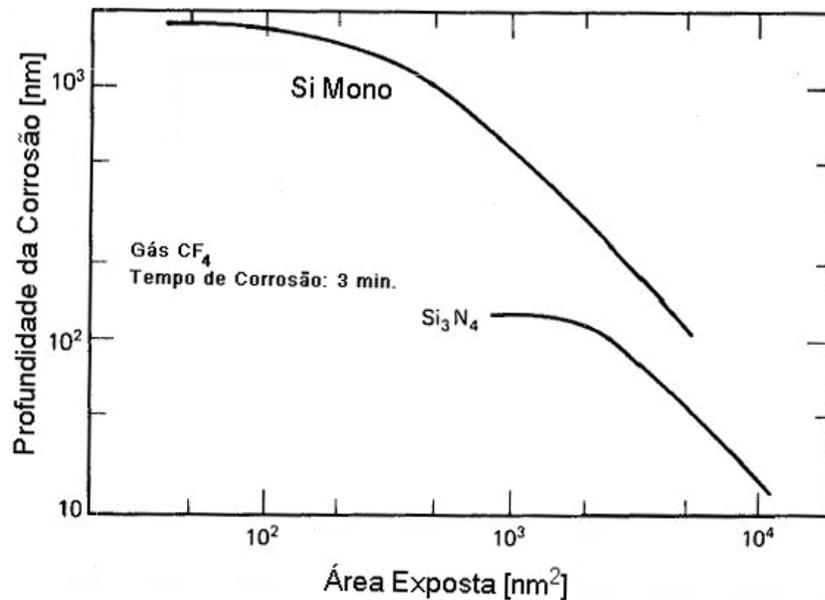


Figura 3.29. Gráfico da profundidade da corrosão em função da área exposta do substrato. Nota-se que para uma determinada faixa de área exposta no gráfico a variação é praticamente linear. [26].

O efeito de carga é geralmente relacionado ao número de lâminas colocadas dentro da câmara de reações em condições onde há um déficit global de espécies reativas, este efeito de carga é chamado de macro carga (*macroloading*). Porém, existe o efeito de carga a nível microscópico (*local loading* ou *microloading*), onde há uma redução na taxa de corrosão por uma depleção local de espécies reativas. A redução na taxa de corrosão pode ser causada também pelas limitações de transporte de espécies reativas e subprodutos voláteis, sendo dependente, portanto, da densidade e das dimensões de mascaramento da amostra [11, 28]. Este tipo de efeito de carga a nível local é comumente observado no fenômeno conhecido por RIE-lag [19].

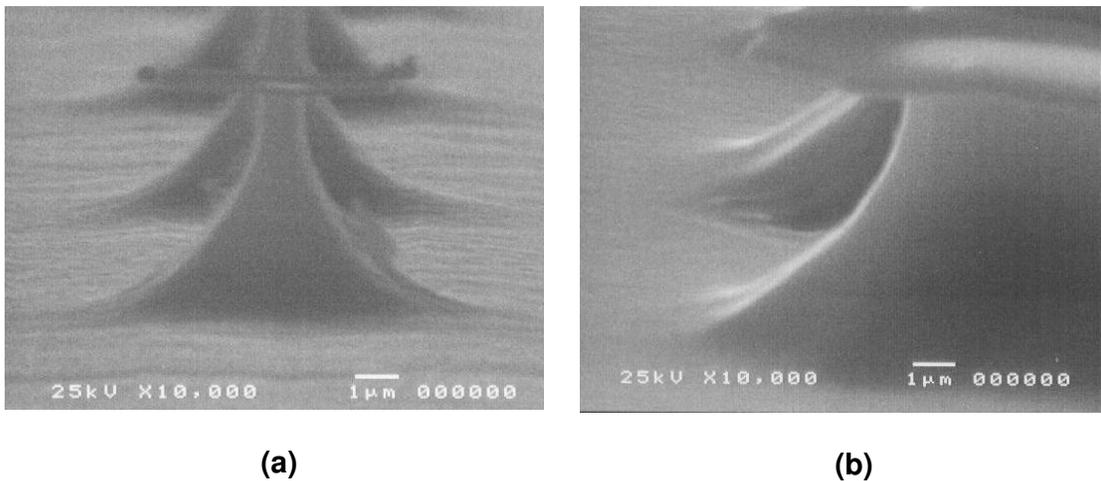


Figura 3.30. Figuras representativas mostrando o efeito de carga local, *microloading*, dando suporte aos dados apresentados pelo gráfico da figura 3.32.

Para a comprovação do efeito de carga microscópico, colocamos duas amostras com áreas diferentes em um mesmo processo (32 sccm de SF₆ e 8 sccm de O₂ por 35 min.). A estrutura da figura 3.30a ($h=5,02 \mu\text{m}$) é resultado de uma

amostra onde aproximadamente 90% da área do substrato está exposta, e a estrutura 3.30b ($h=7,05 \mu\text{m}$) de uma amostra onde aproximadamente 60% da área do substrato encontra-se exposta. A diferença na profundidade da corrosão de aproximadamente $2 \mu\text{m}$ pode ser explicada pelo conceito de efeito de carga local apresentado.

Nos processos de corrosão onde o filme é relativamente espesso, a área de exposição deste filme sempre será a menor antes do início do processo (ver figura 3.31). Portanto, a taxa de corrosão na direção vertical (razão entre a profundidade de corrosão e o tempo de corrosão) sempre tenderá a diminuir com o decorrer do processo, seja pelo aumento da área exposta ou pelas limitações de transporte de espécies reativas.

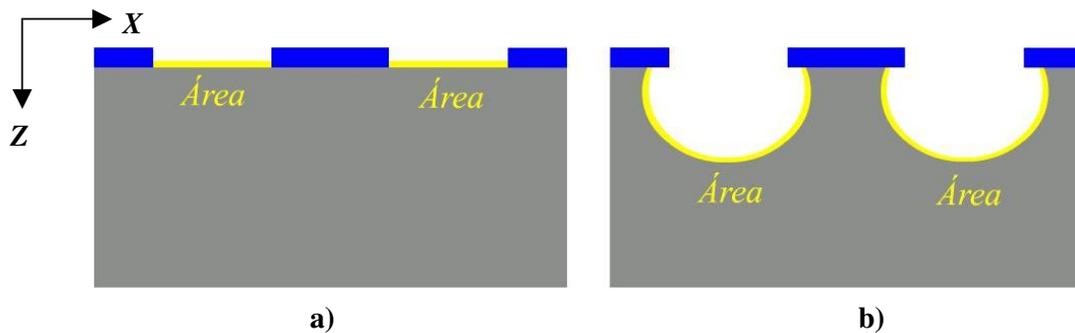


Figura 3.31. a) Amostra antes do processo de corrosão; b) Amostra após o primeiro processo de corrosão (experiência 2).

A não linearidade da taxa de corrosão do silício na direção vertical (eixo z) durante o processo pode ser observada no gráfico da figura 3.32.

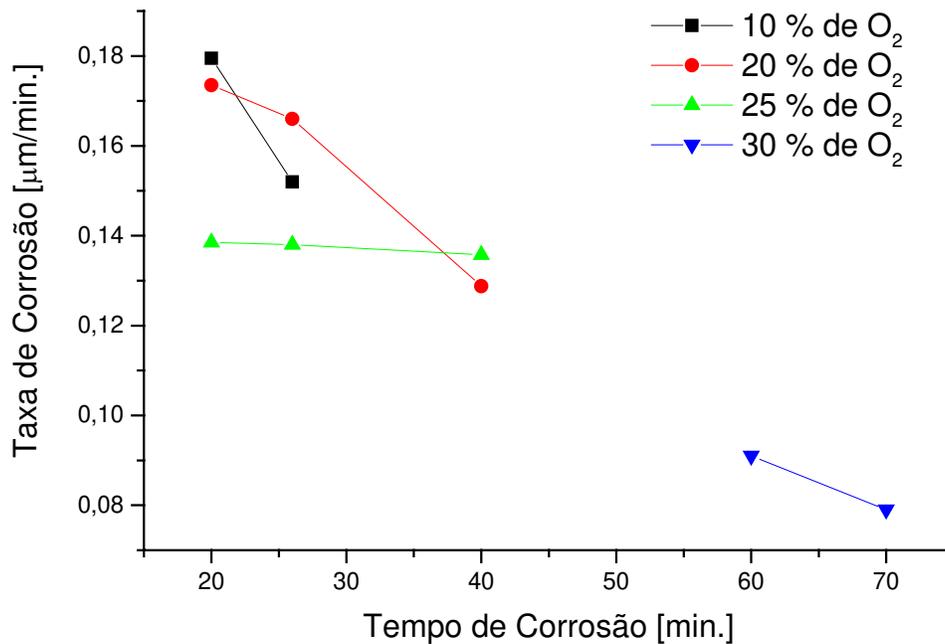


Figura 3.32. Gráfico mostrando a variação da taxa de corrosão do silício em função do tempo de corrosão.

Um outro fator que interferiu nos processos foi o valor da dimensão lateral da máscara. As medidas realizadas através de microscopia óptica mostravam que as máscaras apresentavam uma dimensão lateral de 6μm. Após a verificação das medidas por microscopia eletrônica de varredura obteve-se a confirmação de que a máscara possuía uma dimensão lateral inferior ao esperado (figura 3.33). Essa diferença deve-se provavelmente ao processo de corrosão do filme de dióxido de silício por plasma de CF₄ (cap. 3 subseção 3.1.4).

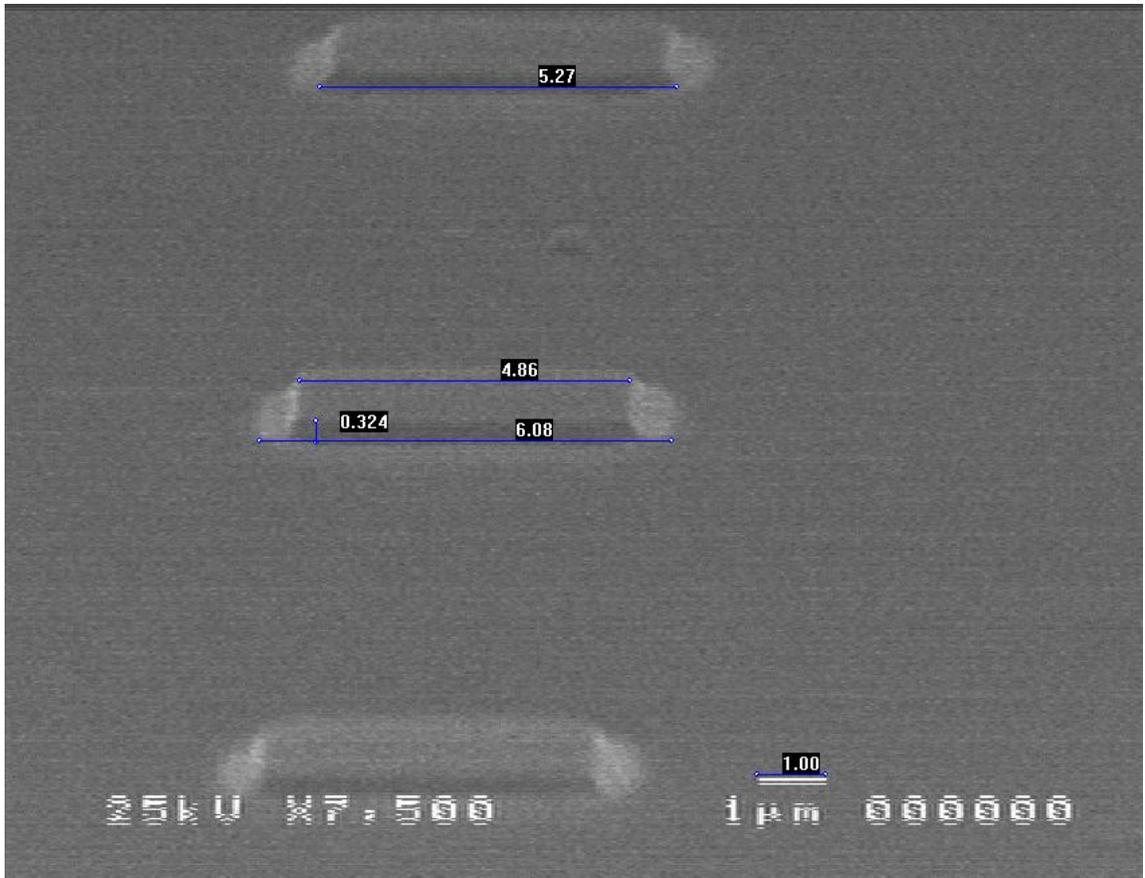


Figura 3.33. Figura representativa da máscara utilizada no processo de corrosão. As medidas obtidas através da técnica de microscopia eletrônica de varredura confirmam as dimensões laterais reduzidas da máscara.

De acordo com a análise realizada em [12], as componentes horizontal e vertical da taxa de corrosão do SiO_2 , (T_{SiO_2h} e T_{SiO_2v} , respectivamente) e o ângulo formado entre a base do filme de e sua lateral, θ , são responsáveis por uma redução da dimensão lateral do dispositivo igual a Δ (ver equação 3.10).

$$\Delta = 2 \cdot t \cdot (T_{SiO_2h} + T_{SiO_2v} \cdot \cot \theta) \quad (3.10)$$

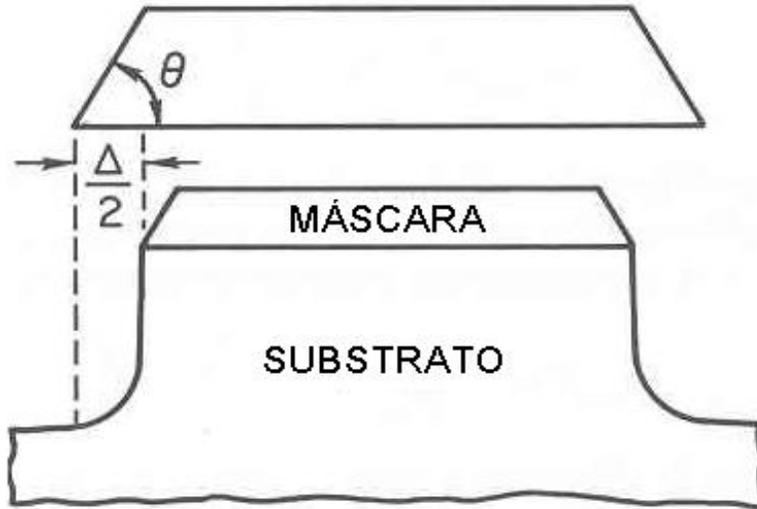


Figura 3.34. Caso a máscara utilizada tenha um ângulo θ em suas laterais, a máscara será contraída e o dispositivo terá uma redução lateral de $\Delta/2$ em cada lado [12].

Conforme apresentada no gráfico da figura 3.20 pela curva da anisotropia, a microponteira vista na figura 3.23 (10% de oxigênio) possui o perfil mais isotrópico e a vista na figura 3.25 (25% de oxigênio) o mais anisotrópico. Uma transparência acentuada das máscaras é observada em função do aumento do tempo de processo, indicando uma diminuição de sua espessura.

Os dispositivos fabricados com 30% de oxigênio foram limitados pelo processo de corrosão do dióxido de silício, onde a espessura da máscara não foi suficiente para a finalização do processo. O tempo máximo calculado para a permanência da amostra no volume do plasma em uma concentração de 50% de oxigênio (condição onde a amostra permanece um maior tempo no plasma) é de 63 minutos. No entanto, na condição de 30% de oxigênio, o tempo de processo

extrapolou este valor chegando aos 70 minutos ainda com a máscara em seu topo. Nessas condições a máscara apresentava uma redução de aproximadamente 80% em sua dimensão lateral. Devemos lembrar que além da taxa de corrosão do SiO_2 , é importante também a verificação da taxa de erosão da máscara (taxa de corrosão horizontal – eixo x), uma vez que esta interfere diretamente sobre o perfil da corrosão. A superfície destas amostras apresenta uma maior rugosidade devido a maior concentração de oxigênio no sistema [23,24].

A análise da taxa de corrosão do silício e do dióxido de silício, da espessura e das dimensões da máscara, da qualidade de superfície e da uniformidade assim como o resultado das simulações apresentadas no apêndice 2 nos permite afirmar que o processo com concentração de 25% de oxigênio é o mais indicado para a fabricação das microponteiras. Para a finalização do processo de fabricação, a amostra vista na figura 3.25 permite um período maior de corrosão e/ou uma etapa de oxidação para o afinamento final do dispositivo.

4 CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi estabelecido e caracterizado um processo de fabricação de microponteiras de silício utilizando o SF₆ e o O₂ como gases precursores. A determinação de parâmetros como taxa de corrosão e efeito de carga permitiram um controle preciso sobre as características do processo. Os dispositivos fabricados na condição de 25% de oxigênio apresentaram os melhores resultados na simulação (apêndice 2) devido a uma anisotropia relativamente elevada além de uma alta taxa de corrosão do silício e uma excelente uniformidade e qualidade de superfície.

A utilização do dióxido de silício como máscara limitou o processo em determinadas condições, não apresentando resistência suficiente à corrosão seca. Sugere-se então a utilização de outros materiais como Al ou Cr, cuja seletividade em relação ao silício pode atingir valores maiores. A anisotropia pode ser melhorada através da introdução de gases como o CHF₃, CH₄ (responsáveis pela passivação através de polimerização), Ar (aumento da energia iônica) e Cloro. Podemos sugerir ainda para a fabricação de microponteiras de silício a utilização de novas técnicas de corrosão profunda, DRIE (*Deep-reactive-ion-Etching*), como processo Bosch, que apresenta capacidade de produzir estruturas com elevada razão de aspecto, HARS (*High-Aspect-Ratio Structures*) [29] utilizando nosso sistema.

5 APÊNDICES

5.1 APÊNDICE 1 – Cálculos para a corrosão das Microponteiras

A partir da equação 3.9:

$$t_{cor.} = \frac{W_m - W_p}{2 \cdot R_{Si} \cdot (1 - A)}$$

Calcula-se o tempo de corrosão para as condições determinadas no experimento numero 2 considerando a dimensão lateral da máscara igual a 6 μm e da dimensão desejada da ponta de 1 μm .

$$W_m = 6 \mu\text{m} ; W_p = 1 \mu\text{m}$$

a) 10% de oxigênio:

Corrosão do Silício:

$$t_{cor.} = \frac{6 - 1}{2 \cdot 0,1795 \cdot (1 - 0,677)} = 43,12 \text{ min .}$$

Corrosão do Dióxido de Silício: 45 min.

b) 20% de oxigênio:

Corrosão do Silício:

$$t_{cor.} = \frac{6 - 1}{2 \cdot 0,1735 \cdot (1 - 0,82)} = 80 \text{ min .}$$

Corrosão do Dióxido de Silício: 44 min.

c) 25% de oxigênio:

Corrosão do Silício:

$$t_{cor.} = \frac{6 - 1}{2 \cdot 0,1385 \cdot (1 - 0,77)} = 78,4 \text{ min.}$$

Corrosão do Dióxido de Silício: 48 min.

5.2 APÊNDICE 2 – Simulação do Dispositivo Fabricado Utilizando o Método de Elementos Finitos

Para a simulação do dispositivo fabricado com as condições que apresentaram um melhor resultado (25% de oxigênio), utilizamos o software comercial ANSYS, que utiliza o método de elementos finitos para análise de fenômenos físicos [30]. O programa foi escolhido por apresentar uma grande variedade de análises eletromagnéticas em estruturas criadas pelo usuário, além de ter sido utilizado anteriormente por autores na simulação específica de microponteiras de emissão por campo [31-34].

O primeiro procedimento da simulação é transferir a imagem da estrutura obtida por microscopia eletrônica de varredura para o software (ver figura 5.1).

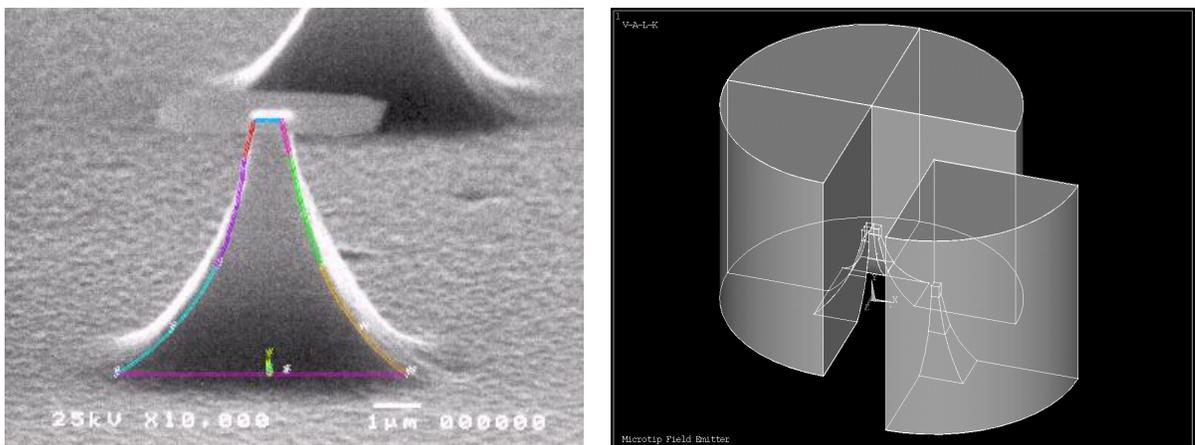


Figura 5.1. (a) Sobreposição das imagens da estrutura obtida através de microscopia eletrônica e (b) da geometria utilizada para a simulação no software ANSYS (modelo 3-D).

A próxima etapa é determinar a dimensão do eletrodo, a distância entre o dispositivo e o eletrodo e os materiais a serem utilizados. O material escolhido para o dispositivo é o mesmo utilizado no processo de fabricação, o silício, e para o eletrodo, optamos pelo alumínio. A distância entre a base do dispositivo e o eletrodo foi estipulada em 15 μm . A figura 5.2 mostra o esquema final utilizado pelo software, onde pode ser observada a representação do dispositivo, do eletrodo, da região de vácuo, e uma camada de elementos infinitos que representa o espaço livre e envolve o sistema (dispositivo, vácuo e eletrodo).

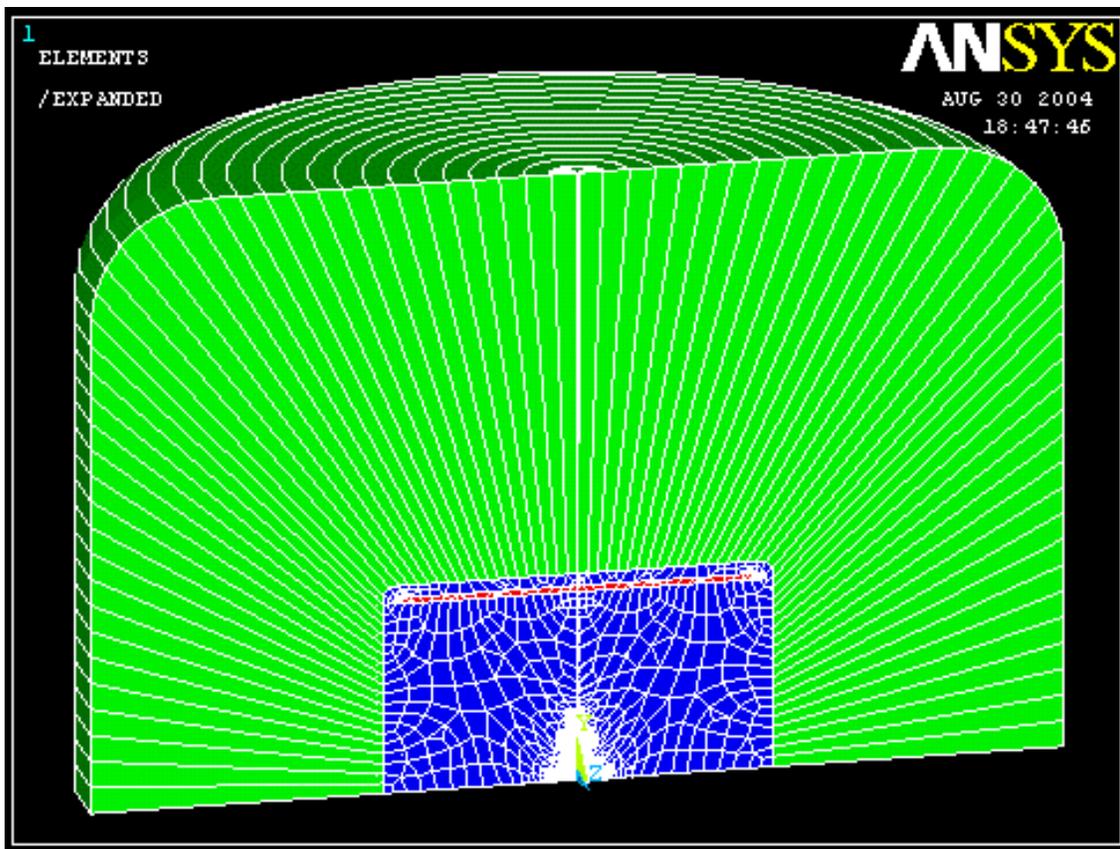


Figura 5.2. Seção transversal do modelo utilizado. A região verde representa os elementos infinitos que são utilizados para representar o espaço livre em simulações eletromagnéticas [30], a região azul representa o vácuo, a região vermelha o eletrodo e a região branca o dispositivo.

Um dos objetivos desta simulação é analisar a distribuição do campo elétrico do dispositivo fabricado através do processo apresentado no presente trabalho. A magnitude do campo elétrico varia em função dos potenciais aplicados ao dispositivo e ao eletrodo, contudo, a distribuição do campo elétrico não se modifica com a variação desses potenciais. Portanto, aplicamos um potencial arbitrário de 0V no dispositivo e 100V no eletrodo na simulação de todas as estruturas. O vácuo utilizado na simulação é considerado ideal, com permissividade $\epsilon_0 = 8,84.10^{-12}$ F/m.

A figura 5.3 apresenta as linhas equipotenciais geradas pelo software. Observa-se que todo dispositivo se encontra sob um potencial de 0V e o eletrodo sob um potencial de 100V.

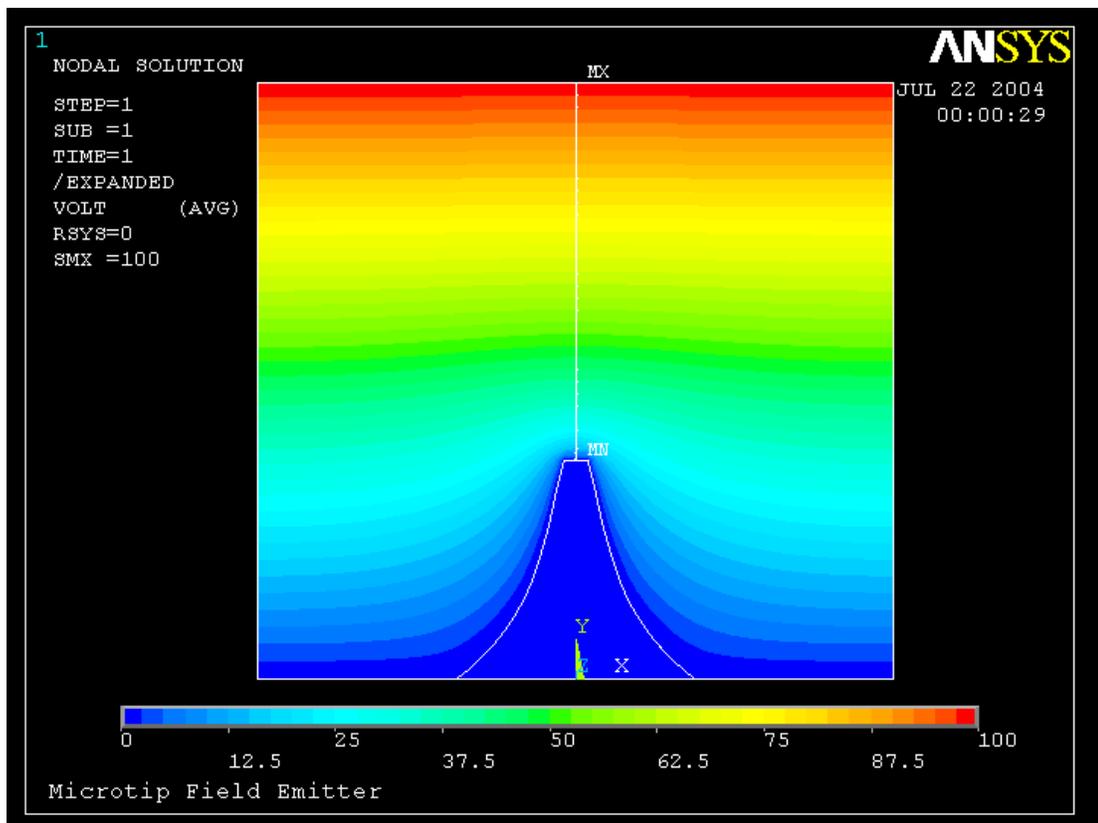


Figura 5.3. Figura do dispositivo fabricado apresentando as linhas equipotenciais.

O software ANSYS baseia-se nas equações de Laplace para o cálculo da magnitude do campo elétrico [30,34]. A partir das grandezas já estabelecidas, o software resolve o cálculo para a determinação do campo elétrico, apresentando como resultado a figura 5.4.

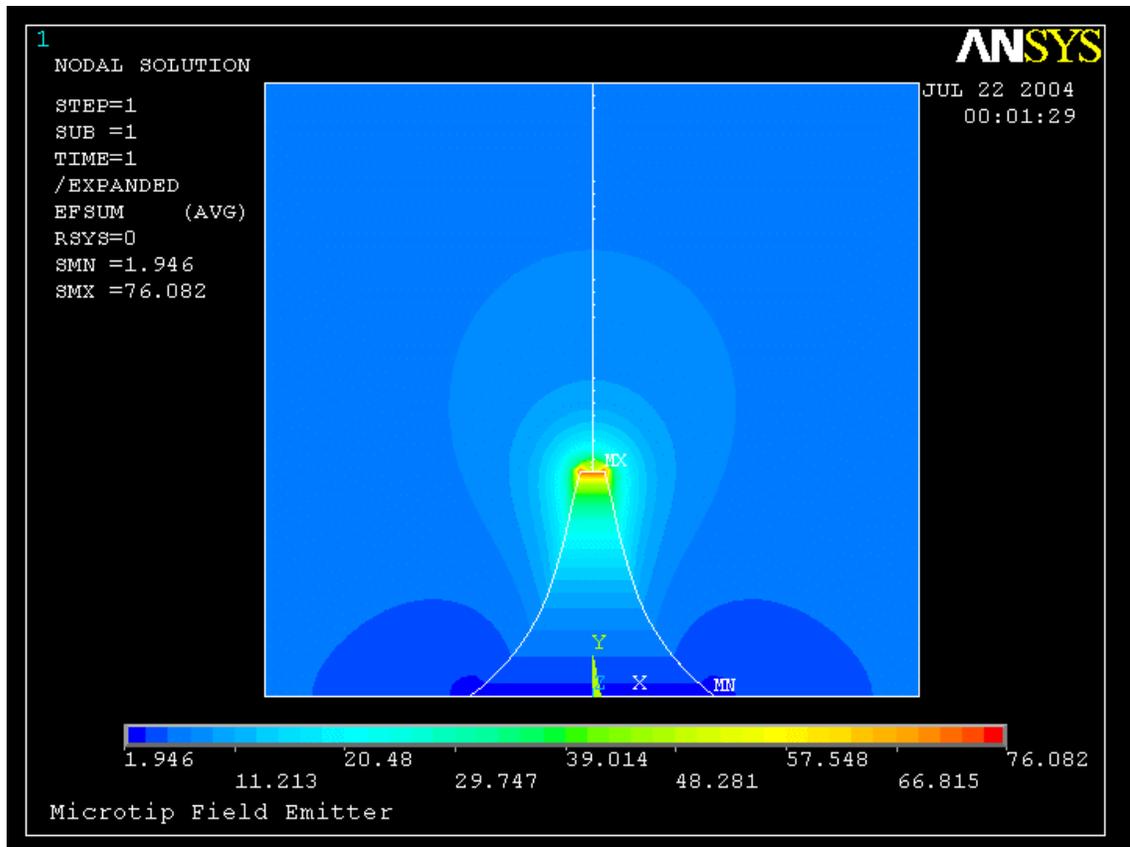


Figura 5.4. Figura apresentando a distribuição do campo elétrico.

O valor máximo do campo elétrico se encontra sobre o pico do dispositivo, e nas condições apresentadas nesta simulação (tensão de 100V entre o eletrodo e o dispositivo) possui o valor de $76\text{V}/\mu\text{m}$. Portanto, nessa região, se espera um maior fluxo de portadores, e conseqüentemente, uma maior emissão de elétrons.

5.2.1 – Comparação entre os Resultados da Simulação do Dispositivo Fabricado e de Outras Estruturas Apresentadas na Literatura.

Existem na literatura várias formas geométricas de estruturas que são utilizadas como dispositivos de emissão por campo. Para a comparação das características de emissão dessas várias estruturas, propôs-se a introdução da figura de mérito [8]. Através da análise da figura de mérito de estruturas com formas geométricas diferentes, concluiu-se que a estrutura na forma de poste com o pico arredondado é a geometria mais próxima da geometria de emissão ideal, que é uma esfera metálica flutuando sobre o substrato [8].

Para a simulação do dispositivo na forma de poste com o ápice arredondado, foi utilizado as mesmas características da simulação anterior (mesmos materiais, vácuo ideal, distância entre o eletrodo e a base do dispositivo igual a $15\mu\text{m}$, potencial do eletrodo de 100V e do dispositivo de 0V). O dispositivo foi modelado utilizando os mesmos valores de altura e raio da ponta do dispositivo fabricado ($5,5\mu\text{m}$ de altura e raio de $0,5\mu\text{m}$).

A figura 5.5 mostra as superfícies equipotenciais e a figura 5.6 mostra a distribuição de campo elétrico para a geometria com forma de poste com ápice arredondado.

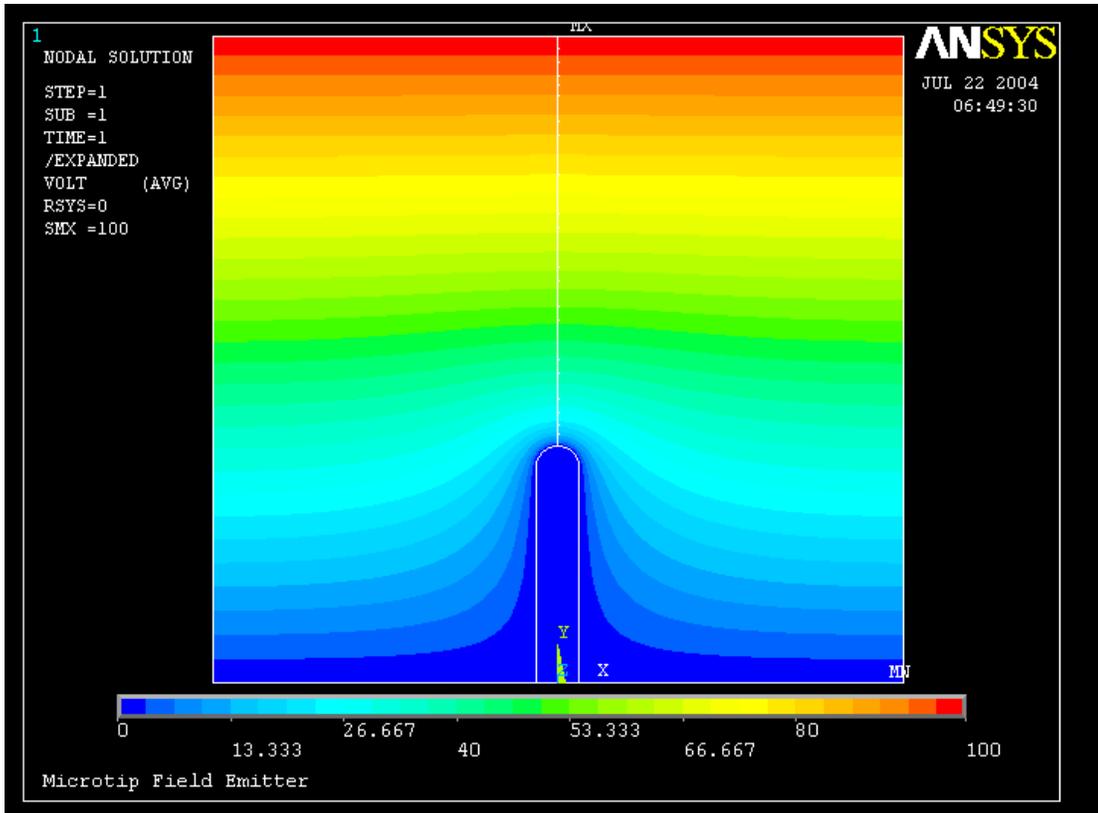


Figura 5.6. Figura apresentando as linhas equipotenciais da geometria “ideal”.

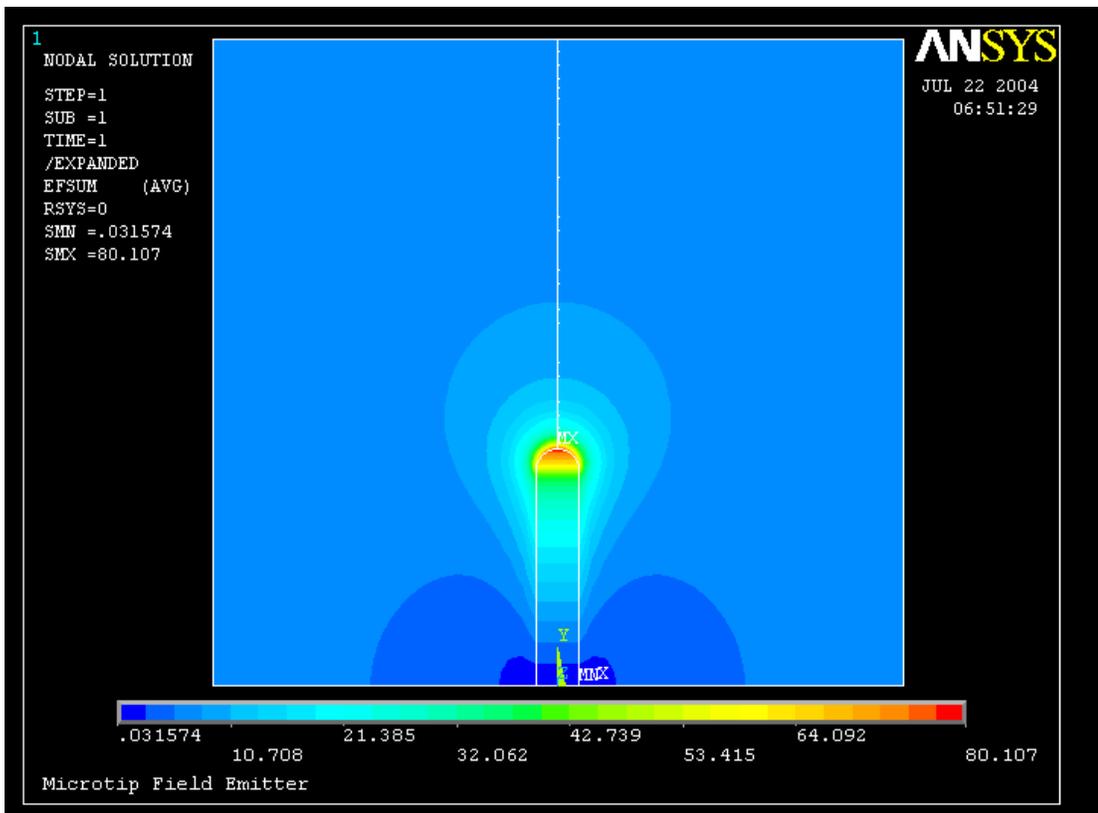


Figura 5.6. Figura apresentando a distribuição do campo elétrico da geometria “ideal”.

Observa-se que o valor máximo do campo elétrico para esta estrutura é de $80\text{V}/\mu\text{m}$, superior ao valor máximo do campo elétrico da estrutura fabricada ($76\text{V}/\mu\text{m}$), confirmando que a estrutura em forma de poste com pico arredondado possui uma melhor característica em relação à emissão. O valor do campo elétrico no píco desta estrutura, E , varia segundo a equação 5.1 [8].

$$E = (h/r) E_0 \quad (5.1)$$

Onde E_0 é o campo paralelo ao plano do eletrodo no vácuo (ver figura 5.5), h é a altura do dispositivo ($5,5\mu\text{m}$ no nosso caso) e r é o raio da ponta do dispositivo ($0,5\mu\text{m}$ no nosso caso). Após várias simulações variando-se tanto a altura como o raio, foi observada a concordância entre a equação 5.1 e os resultados obtidos através do software ANSYS.

A fabricação do nosso dispositivo deu-se de uma forma anisotrópica, portanto, uma outra geometria interessante para efeito de comparação é a forma de um dispositivo com perfil isotrópico. Considerando a máscara com dimensão lateral de $6\mu\text{m}$ antes do processo de fabricação e o raio do ápice do dispositivo de $0,5\mu\text{m}$, obtemos uma estrutura com perfil isotrópico de $2\mu\text{m}$ de altura.

A figura 5.7 mostra as superfícies equipotenciais e a figura 5.8 mostra a distribuição de campo elétrico para o a geometria com perfil isotrópico.

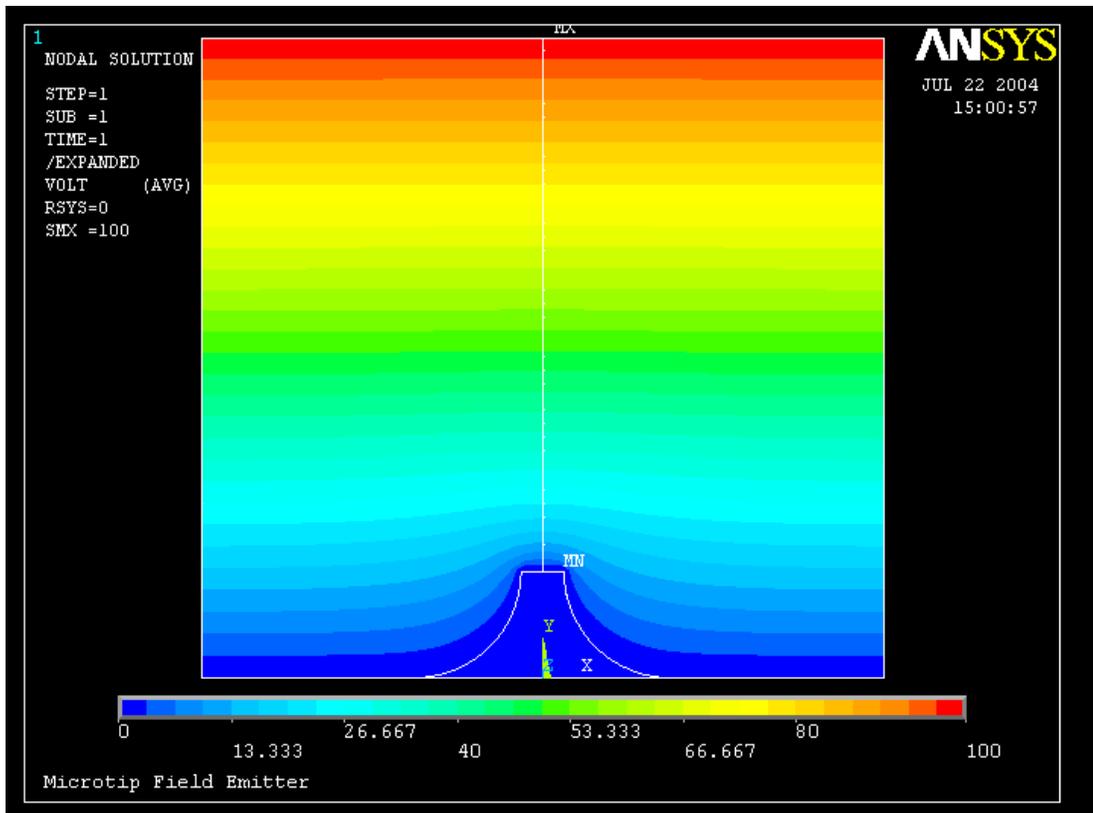


Figura 5.7. Figura apresentando as linhas equipotenciais da geometria isotrópica.

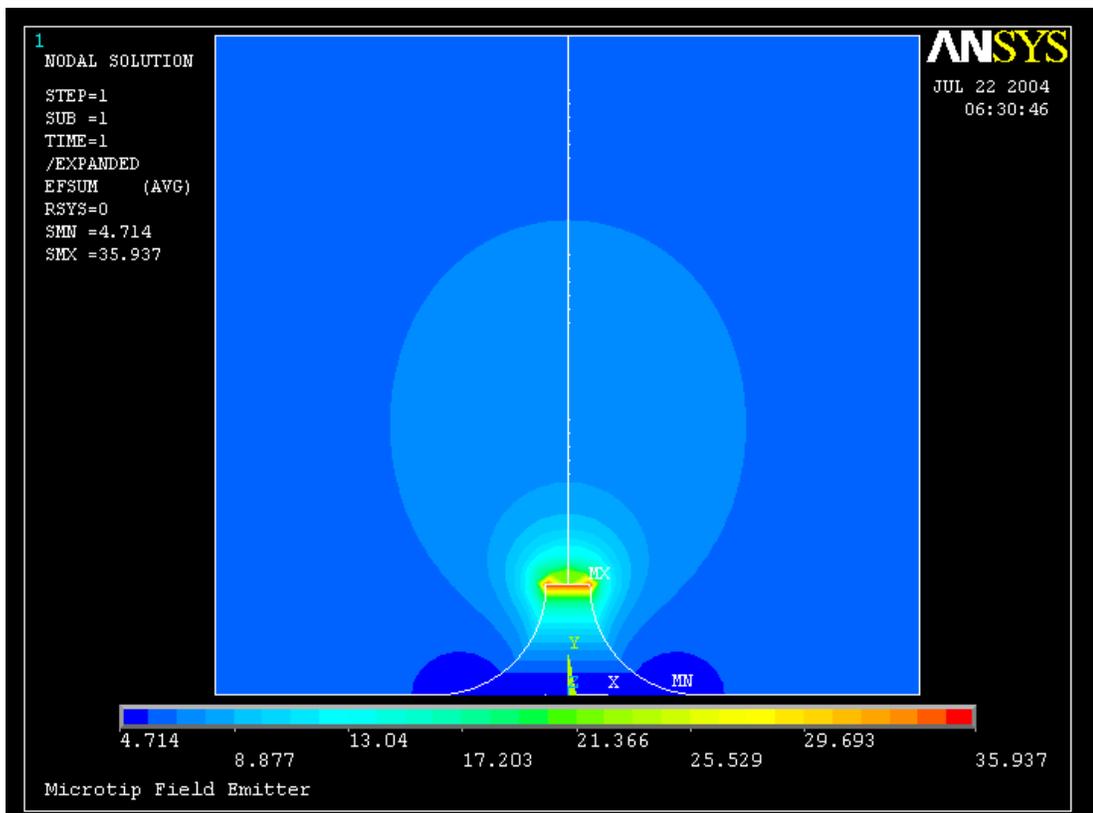


Figura 5.6. Figura apresentando a distribuição do campo elétrico da geometria isotrópica.

Dentre as três estruturas simuladas, a geometria com perfil isotrópico apresenta o menor valor de campo elétrico na região do pico do dispositivo ($35\text{V}/\mu\text{m}$). Portanto, espera-se que a estrutura fabricada através do processo estabelecido em nosso trabalho apresente uma melhor característica de emissão em relação à estrutura isotrópica.

A característica de emissão assim como os valores máximos de campo elétrico na região de pico de todos os dispositivos simulados pode ser melhorada através da redução do raio da ponta e do aumento da altura das estruturas. Para o dispositivo fabricado em nosso trabalho, basta aumentar o tempo do processo de corrosão para que estas mudanças sejam realizadas.

6 REFERÊNCIAS

1. Lewtosky, K. *Field Emission Displays: Technology of the Future*. Optical Engineering Magazine, (1995).
2. I. Brodie, P.R. Schwoebel, *Proc. IEEE*, 82 (1994) 1006-1034.
3. D.R. Whaley, B. Gannon, C. R. Smith, *IEEE Trans. Plasma Science*, 28 (2000) 727-747.
4. K. L. Jensen, *Phys. Plasmas*, 6 (1999) 2241–2253.
5. K.L. Jensen, *Theory and Simulation of Field Emission From Microstructures*. Naval Research Laboratory: Cathode Workshop , (2001).
6. T. Utsumi, *IEEE Trans. Electron Devices*, 38 (1991) 2276-2283.
7. M. O. S. Dantas et all, *Electrochemical Process for Silicon Tips Fabrication*, SBMicro, São Paulo (2003).
8. P. A.Rasmussen, J. Thaysen, S. Bouwstra; A. Boisen, *Sensors and Actuators A*, 92 (2001) 96-101.
9. M.A.R. Alves, L.F. Porto, P.H.L. de Faria, E.S. Braga, *Vacuum*, 72 (2004) 485-488.
10. J. H Choi et all, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 18 (2000) 984-988.
11. A. Grill, *Cold Plasma in Material Fabrication: From Fundamentals to Applications*. New York: IEEE, 1994.
12. D. L. Flamm, D. M. Manos, *Plasma Etching: An Introduction*. Academic Press: Orlando, FL. 1989.
13. O. Balachova, *Contribuição ao Estudo das Propriedades Dielétricas e Mecânicas dos Filmes Finos de a-C:H, Obtidos por PECVD*, Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2001).
14. J. W. Coburn, *Plasma Assisted Etching in VLSI: Equipment-Related Considerations*. Fourth Brazilian Workshop on Microelectronics, Campinas (1983) 41-82.
15. J. L. Mauer et all, *J. Vac. Sci. Technol.*, 15 (1978) 333.
16. D. L. Flamm, V. M. Donnelly, *Plasma Chem. Plasma Process*, 1 (1981) 317 *apud* A. Grill, *Cold Plasma in Material Fabrication: From Fundamentals to Applications*. New York: IEEE (1994) 224.

17. T. J. Tu, T. J. Chuang, H. F. Winters, *Phys. Rev.*, B23 (1981) 823.
18. Wolf e R.N. Tauber, "Dry Etching for VLSI Fabrication", em *Silicon Processing for VLSI Era, Volume 1: Process Techonology*, Lattice Press, California, p. 539, (1990).
19. R. Legtenberg et al, *J. Electrochem. Soc.*, 142 (1995) 2020-2028.
20. R. d'Agostino, D. L. Flamm, *J. Appl. Phys.*, 52 (1981) 162-166.
21. G. Kumaravelu, M. M. Alkaisi, A. Bittar, *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. New Orleans, LU (2002).
22. C. J. Mogab, A. C. Adams, D. L. Flamm, *J. Appl. Phys.*, 49 (1979) 3796.
23. H. Jansen et all, *J. Micromech. Microeng.*, 5 (1995) 115-120.
24. T. Wells, El-Gomati, J. Wood, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 15 (1997) 434-438.
25. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.
26. S. K. Ghandhi, *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*, 2^a edição, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994 *apud* D. G. Ast, E. C. Kan, *Dry Etching I*, ECE 336 Nanofabrication, Cornell University (2004).
27. M. Engelhard, S. J. Shwarzl, *J. Electrochem. Soc.*, 134 (1987) 1985 *apud* A. Grill, *Cold Plasma in Material Fabrication: From Fundamentals to Applications*. New York: IEEE (1994) 234.
28. S. Jensen, O. Hansen, *Proceedings of SPIE*, 5342-15 (2004).
29. A. Ayón, R. L. Bayt, K. S. Breuer, *Smart Mater. Struct.*, 10 (2001) 1135-1144.
30. ANSYS 8.0, Manual de Referências e Documentação.
31. D. M Aslam, *Proceedings of the IEEE International Vacuum Microelectronics Conference*, 336-340.
32. A. Seidl et all, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 18 (2) (2000), 929-932.
33. S. Bae et all, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 22 (3) (2004), 1303-1307.
34. K. H. Park, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 21 (4) (2003), 1680-1683.