

Antonio Carlos Seabra

**Técnicas Litográficas Não Convencionais para
Fabricação de Microdispositivos**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para participação no Concurso à
Livre Docência junto ao Departamento de
Engenharia de Sistemas Eletrônicos, na
Especialidade de “Dispositivos Eletrônicos
e Microdispositivos”

São Paulo
2002

Seabra, Antonio Carlos

Técnicas Litográficas Não Convencionais para Fabricação de Microdispositivos. São Paulo, 2002.

154 p.

Tese (Livre Docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Litografia 2. Microdispositivos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. II. t

Pessoas que partem são livros especiais:
por mais que os adoremos e aprendamos,
sabemos que nunca vamos terminar de ler.
Ao meu querido pai.

Agradecimentos

- Aos meus alunos Dr. Carlos Kazuo Inoki, MSc. Ana Paula Mousinho dos Santos e MSc. Hamilton Fernandes de Moraes Junior, sem os quais este trabalho seria impossível;
- Ao Dr. Murilo A Romero, Dr. Luis G. Neto, Dr. Ronaldo D. Mansano e Dr. Eliphas Wagner Simões pelas valiosas colaborações;
- Ao Técnico Eletrônico Fábio Gonçalves Araes pela preparação e análise de amostras;
- Ao Prof. Dr. João Antonio Zuffo, Coordenador do LSI/PSI/EPUSP pelas facilidades oferecidas para realização deste trabalho;
- Aos colegas e amigos do LSI/PSI/EPUSP, pelas colaborações prestadas em algum momento deste trabalho.
- A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e involuntariamente foram omitidos.

Lista de símbolos

γ	Contraste do resiste
D	Dose
DESIRE	Diffusion Enhanced Silylation RESist
DQ	DiazoQuinona
DQN	DiazoQuinona Novolac
DUV	Deep Ultra Violet
ECR	Electron Ciclotron Ressonance
FTIR	Fourier Transform InfraRed spectroscopy
HARMS	High Aspect Ratio Micro Systems
HMCTS	HexaMetilCicloTriSilazana
HMDS	HexaMetilDiSilazana
ICA	Indene Carboxilic Acid
ICP	Inductively Coupled Plasma
k, k1, k2	Constantes de proporcionalidade (Rayleigh)
L	Distância entre os eletrodos
LIGA	Lithografie Galvanoformung Abformtechnik
Linha-g	Comprimento de onda de 436 nm
Linha-i	Comprimento de onda de 365 nm
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
M	Melamina
MEMS	MicroElectroMechanical System
N	Novolac
PAC	PhotoActive Compound
PGMEA	PropilenoGlicolMetilEterAcetato
PMMA	Polimetacrilato de metila
PRIME	Positive Resist Image by dry Etching
RBS	Rutherford Backscattering Spectroscopy
RIE	Reactive Ion Etching
S	Sensibilidade do resiste
SEM	Scanning Electronic Microscopy
Si-CARL	Silicon Chemical Amplification of Resist Lines
SIMPLE	Silylation resist using chemical Amplification for Electron Beam
SLIGA	Sacrificial Lithografie Galvanoformung Abformtechnik
SUPER	SUBmicron Positive dry-Etching Resist
Tg	Temperatura de transição vítrea
TSI	Top Surface Imaging
UV	Ultra Violeta
Vdc	Potencial de auto polarização
Vp	Potencial de plasma
x,y,z	Coordenadas cartesianas
Δ	Aquecimento
Ψ	Ângulo de sililação
λ	Comprimento de onda

Sumário

AGRADECIMENTOS	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	V
SUMÁRIO.....	VI
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
1. LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS	1
1.1 LITOGRAFIA PARA CIRCUITOS INTEGRADOS.....	1
1.2 LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS ELETROMECAˆNICOS	4
1.2.1 O Processo LIGA.....	5
1.2.2 O Processo HARMS.....	6
1.3 LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS ˆPTICOS.....	8
2. CONCEPˆO E INSTALAˆO DE UM SISTEMA DE LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS	12
2.1 INTRODUˆO.....	12
2.2 EQUIPAMENTO DE ESCRITA DIRETA.....	13
2.3 RESISTES.....	16
2.3.1 Resistes Amplificados Quimicamente.....	17
2.3.2 Resistes Multicamadas.....	18
2.3.3 Resistes Sililados	19
2.4 EQUIPAMENTOS DE PREPARAˆO E REVELAˆO DE RESISTES	22
2.4.1 Prato Giratˆrio.....	22
2.4.2 Sililaˆo.....	23
2.4.3 Revelaˆo Seca.....	24
2.5 CAD PARA CONFECˆO DE LAYOUTS.....	25
2.6 CAD PARA SIMULAˆO DA ETAPA DE LITOGRAFIA.....	26
2.6.1 O mˆdulo de correˆo de efeito de proximidade do ProxyWriter.....	26
2.6.2 O Software CASINO	27
2.6.2.1 Simulando a etapa de exposiˆo.....	28
2.6.2.2 Simulando a etapa de revelaˆo	29
2.7 CONCLUSˆES	30
3. LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS ELETROMECAˆNICOS	31
3.1 INTRODUˆO.....	31
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.2.1 Caracterizaˆo da Espessura do Resiste.....	32
3.2.2 Estudo da Exposiˆo por Feixe de Elˆtrons.....	36
3.2.3 Estudo da Sililaˆo do Resiste ARP-322	38
3.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	42
3.3.1 Desenvolvimento do Processo Tripla Camada com Resiste Espesso	42
3.3.1.1 Caracterizaˆo Inicial	42
3.3.1.2 Estudo da Etapa de Corrosˆo do Processo Tripla Camada.....	45
3.3.2 Desenvolvimento do Processo de Camada Simples com Sililaˆo	51
3.3.3 Utilizaˆo do Processo de Tripla Camada na Fabricaˆo de Microengrenagens.....	52
3.3.4 Utilizaˆo do Processo de Tripla Camada na Fabricaˆo de Microsciladores Flˆidicos.....	53

4. LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS ÓPTICOS	58
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	58
4.2.1 Preparação das amostras	59
4.2.2 Obtenção do filme espesso de PMMA.....	59
4.3 SIMULAÇÃO USANDO O SOFTWARE CASINO.....	65
4.3.1 Cálculo do resiste removido:.....	66
4.3.2 Cálculo da solubilidade:.....	66
4.3.3 Encontrando a densidade de energia em função da profundidade:.....	66
4.3.4 Calculando a densidade de energia para cada profundidade:	67
4.4 SIMULAÇÃO DAS MICROLENTES.....	68
4.4.1 Simulação de uma microlente simples	68
4.4.2 Simulação de uma matriz de microlentes	70
4.4.3 Obtenção das microlentes.....	70
4.4.3.1 Obtenção e caracterização da microlente simples.....	71
4.4.3.2 Obtenção e caracterização da microlente dupla	74
4.4 RESULTADOS.....	78
5. CONCLUSÕES E PERSPECIVAS FUTURAS	81
5.1 LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS MEMS.....	81
5.2 LITOGRAFIA PARA MICRODISPOSITIVOS ÓPTICOS.....	81
5.3 PERSPECTIVAS FUTURAS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

Resumo

Neste trabalho estabelecemos um sistema de litografia por feixe de elétrons voltado à pesquisa, especialmente para fabricação de microdispositivos eletromecânicos e ópticos e descrevemos algumas aplicações desse sistema. Inicialmente descreve-se o sistema litográfico estabelecido, suas principais características, equipamentos e ferramentas de *software* agregadas. A seguir descreve-se o desenvolvimento de processos litográficos empregando-se resists espessos, procurando-se enfatizar os aspectos distintos da litografia tradicional para CIs. Também é dada especial atenção à modelagem de perfis de relevo contínuo para fabricação de microdispositivos ópticos. Como exemplos práticos da aplicação desse sistemas são mostrados os resultados obtidos na fabricação de microengrenagens, microosciladores fluídicos e microlentes de relevo contínuo.

Abstract

In this work it is presented an e-beam direct write lithographic system dedicated to research and especially designed for microelectromechanical and microoptical devices together with some of its possible applications. These system, its characteristics, modules and software tools are first described. Then some of the lithographic processes developed for thick resist applications are detailed, giving special attention to aspects that are considerably different from tradition IC lithography. Modeling and simulation of continuous relief profiles for microoptical applications are also emphasized. Finally, practical examples of application of this system are shown: fabrication of microgears in resist, fabrication of microfluidic oscillators, and fabrication of continuous relief microlenses.

1. *Litografia para Microdispositivos*

As etapas de processo em microeletrônica tradicional têm sido utilizadas em outras áreas de aplicações, notadamente na fabricação de sensores [1], atuadores e micromáquinas [2] e elementos microópticos [3].

Este trabalho visa estudar a fabricação dessas estruturas por escrita direta, sem a utilização de máscaras, o que permite obter microestruturas complexas diretamente a partir da base de dados em computador por meio de uma única etapa de exposição e por meio do processamento adequado. A flexibilidade e rapidez dessa técnica a tornam adequada para a utilização no desenvolvimento de novos dispositivos.

A razão para a utilização da microeletrônica e mais precisamente da tecnologia de silício nessas outras áreas tem como fator decisivo a existência de etapas e processos maduros e a considerável redução de custos quando comparada a formas tradicionais de fabricação de sensores, atuadores e dispositivos ópticos. Por outro lado, é claro que tais etapas de processo e os equipamentos nela utilizados devem ser modificados para se adequar às novas especificações solicitadas. Atualmente, é considerado crucial para o avanço e maior uso dessas novas aplicações o aprimoramento dessas etapas[4].

Neste capítulo, inicialmente será apresentado o estado da arte da litografia para circuitos integrados que servirá de referência para os dois tópicos apresentados a seguir, a litografia para microdispositivos eletromecânicos e a litografia para microdispositivos ópticos.

1.1 *Litografia para Circuitos Integrados*

A etapa litográfica para CIs é dominada na prática pela litografia óptica, principalmente devido aos avanços incrementais que vêm ocorrendo ao longo dos anos. Atualmente utilizam-se equipamentos de passo-repetição (*steppers*) operando em 248 nm (lasers de KrF) capazes de produzir geometrias com 0,13 μ m de largura [5].

A Tabela 1.1 apresenta as principais dimensões a serem atingidas segundo o “International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 1999”[6].

Tabela 1. Marcos tecnológicos para a indústria de semicondutores segundo o ITRS 1999[7].

Ano	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2008	2011	2014
linhas para DRAM (nm)	180	165	150	130	120	110	100	70	50	35
portas para μ P (nm)	230	210	180	160	145	130	115	80	55	40
portas para ASICs (nm)	180	165	150	130	120	110	100	70	50	35

O uso de técnicas de melhoramento de resolução (*resolution enhancement technologies* – RET) como máscaras com deslocamento de fase [8,9] (*phase shifting masks* – PSM), correção do efeito de proximidade óptico [10] (*optical proximity correction* – OPC) e iluminação modificada [11-13] (*off axis illumination* – OAI) permite aos fabricantes gerar estruturas abaixo do comprimento de onda utilizado. Segundo especialistas (sst may 2000) essas técnicas de melhoramento vão garantir o uso da litografia óptica por mais 5 anos (até aproximadamente 70nm), sendo que novas abordagens litográficas serão apenas consideradas daqui a 8 anos, quando as dimensões mínimas estiverem girando em torno de 50nm. A previsão de técnicas a serem exploradas até 2014 encontra-se na Tabela 1.2, segundo o ITRS 99.

As três últimas colunas da Tabela 1.2, em cinza, são aquelas em que novas técnicas podem vir a substituir a litografia óptica do ponto de vista comercial. Dentre essas técnicas F₂+RET, EUV e PXL empregam máscaras de elevada complexidade o que atualmente é uma desvantagem considerável pois grandes fundições de silício, como a Taiwan Semiconductor Manufacturing Corp. (TSMC), usam em média uma máscara para apenas 500 lâminas e não podem trabalhar com custos de US\$ 40.000,00/máscara.

Tabela 1.2. Possíveis soluções litográficas. [7]

Ano	1999	2002	2005	2008	2011	2014
Dimensão mínima	180	130	100	70	50	35
Possíveis soluções	KrF/248nm	KrF+RET	ArF+RET	F ₂ +RET	EUV	EUV
		ArF/193nm	F ₂ /157nm	EPL	EPL	IPL
			PXL	EUV	IPL	EPL
			IPL	IPL	feixe e	feixe e

EPL = Litografia por Projeção de Elétrons
IPL = Litografia por Projeção de Íons

PXL = Raios-X por proximidade
EUV = Ultravioleta extremo

A única técnica apresentada que não utiliza máscaras é a de múltiplas colunas de feixes de elétrons (feixe e^-) onde matrizes de colunas de microscópios de tunelamento com varredura (*scanning tunneling microscope* – STM) escrevem simultaneamente sobre a lâmina. No momento não há nenhum sistema desse tipo em operação embora microcolunas já sejam estudadas a algum tempo, sendo investigadas inclusive pela Motorola [14]. Consultando-se a literatura, aparentemente os fortes candidatos são as técnicas litográficas de projeção de íons (IPL) e de elétrons (EPL). Ambas as técnicas empregam o conceito de espalhamento de elétrons ou íons por meio de uma máscara, havendo uma demagnificação subsequente de 4 vezes (Figura 1.1).

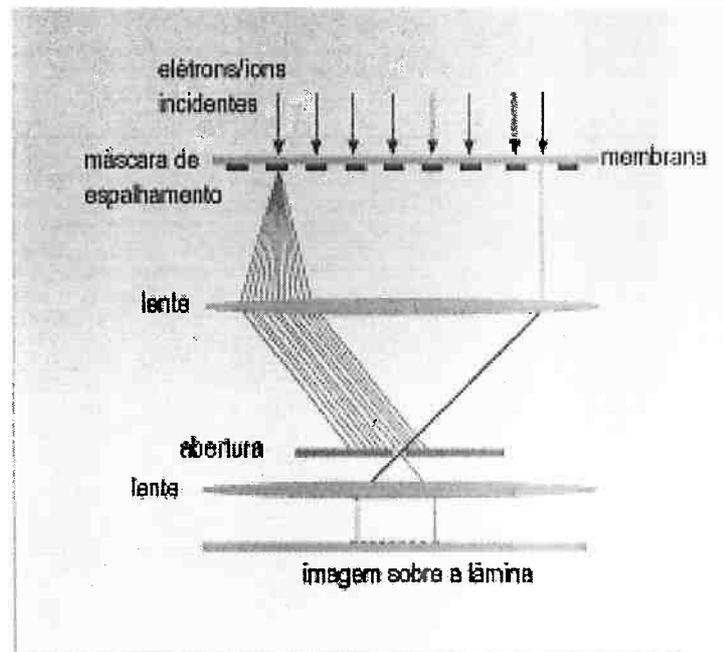


Figura 1.1: Conceito básico das técnicas de projeção por íons e elétrons empregando máscara de redução [15].

As máscaras empregadas nesses casos podem ser de dois tipos, estêncil (vazada) ou de membrana (Figura 1.1) onde a primeira, embora com menor estabilidade mecânica, sofra menos deformações por aquecimento [16]. Essas técnicas estão sendo exploradas basicamente por três consórcios separados mas que se preocupam em utilizar principalmente a tecnologia de máscaras uns dos outros. O consórcio europeu MEDEA, patrocinado pelos governos holandês, austríaco e alemão, além de diversas empresas, desenvolve um sistema de projeção por íons. Já a Lucent Technologies desenvolve um sistema de projeção por elétrons denominado SCALPEL (*SCattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography*) [17] enquanto o consórcio IBM/Nikon desenvolve um sistema similar (porém com varredura tanto da máscara

quanto da lâmina) [18] denominado PREVAIL (*Projection Reduction Exposure with Variable Axis Immersion Lens*).

De uma forma geral, todas as técnicas apresentadas preocupam-se em produzir geometrias nanométricas em grandes campos (20mm × 20mm aproximadamente) e com alta densidade de estruturas. No entanto, para microdispositivos, onde a grande peculiaridade são as elevadas razões de aspecto das estruturas ou seu perfil não convencional (não binário), essas técnicas têm pouco a acrescentar (excetuando-se a técnica de raios-x por proximidade, que é largamente empregada em MEMS).

1.2 Litografia para Microdispositivos Eletromecânicos

A etapa litográfica para MEMS apresenta exigências distintas daquelas tradicionalmente encontradas em microeletrônica [2]. Primeiramente, as dimensões laterais mínimas para MEMS giram em torno de 100 μm , cerca de 50 vezes maiores que as tradicionais, sendo que a área de um dispositivo típico é de duas a três ordens de grandeza maior. Em segundo lugar, as profundidades que devem ser corroídas podem ser cerca de 10 vezes maiores. Isto se traduz em etapas litográficas e de corrosão com especificações bastante distintas [4]: não há a preocupação com alta resolução, porém a capacidade em resolver estruturas com elevadas razões de aspecto (isto é, a razão entre a profundidade a ser corroída e a largura da estrutura, que podem ser da ordem de 10 ~ 50:1), é fundamental. Adicionalmente, o controle das dimensões obtidas (controle de dimensões críticas), pode ser tão ou mais exigente que o tradicional, havendo casos em que a dimensão crítica deve ser controlada em 0,25% (por exemplo, produzir uma estrutura com largura de 100 μm e tolerância de 0,25 μm) [4].

Existem dois tipos básicos de processos de fabricação de estruturas MEMS: o processo de superfície [19] e o processo de corpo [20]. Este último ocupa-se principalmente de estruturas onde a espessura de material a ser removido é da ordem de dezenas ou centenas de micrômetros. Essas estruturas são geralmente conhecidas pelo nome de micromáquinas, cujo exemplo pode ser uma microengrenagem como vista na Figura 1.2.

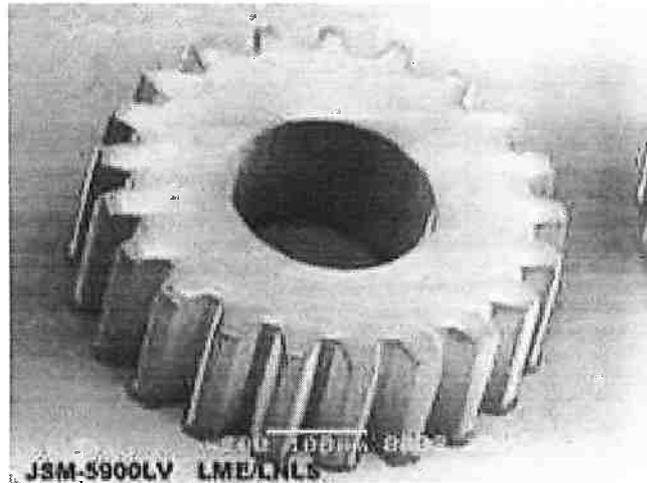


FIGURA 1.2: Engrenagem fabricada no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron-Campinas empregando litografia por raios-x [21].

Essas micromáquinas geralmente requerem estruturas complexas que são espessas e que possuem três dimensões. Por essa razão, muitas tecnologias têm sido estudadas para gerarem estruturas com alta razão de aspecto (altura por largura).

Os processos de litografia e corrosão por plasma são essenciais para definir as estruturas em três dimensões apresentando um bom controle da espessura das camadas e dos perfis de corrosão (anisotrópicos), gerando altas razões de aspecto. Sendo assim, o estudo da otimização de processos litográficos para a aplicação em sistemas MEMS é essencial para se obter as estruturas desejadas que poderão ser empregadas juntamente com as etapas de microeletrônica para a formação de micromáquinas, microssensores e atuadores [22].

1.2.1 O Processo LIGA

O processo LIGA (*Lithografie Galvanoformung Abformtechnik*) combina uma camada sacrificial de fotorresiste espesso (que serve para a fabricação de moldes) com a litografia por raios-x e com a etapa de eletrodeposição. Com esse processo pode-se fabricar estruturas com alta razão de aspecto em metais, por deposição de ouro (ou outro metal), a partir das estruturas definidas em resistes pela litografia por raios-x [23]. Normalmente o polímero usado no processo LIGA é o PMMA (polimetacrilato de metila), onde através de deposições em um prato giratório (*spinner*), pode-se obter camadas espessas de até 500 μm .

Um dos maiores problemas dessa técnica é a grande energia necessária para a sensibilização da camada de resiste. Para uma camada de 1 μm de espessura de PMMA, necessita-se de uma dose de exposição com raios-x de 300 mJ/cm^2 . Os

fotorresistes empregados em microeletrônica são 5 vezes mais sensíveis. Por essa razão, utiliza-se a radiação síncrotron para a exposição por raios-x. A alta densidade do fluxo de raios-x com excelente colimação produz exposições com efeitos de difração desprezíveis e ausência de problemas relacionados a ondas estacionárias. O resultado disso é uma exposição vertical. A região exposta é removida com um revelador de alto contraste. Com essa técnica pode-se obter estruturas com menos de 1 μm de largura por 100 μm de altura (razões de 100:1). De uma forma geral essas estruturas podem ser aplicadas na fabricação de moldes para a geração de estruturas empregadas em sistemas MEMS [24].

A Figura 1.3 apresenta a sequência de fabricação usada em um processo LIGA.

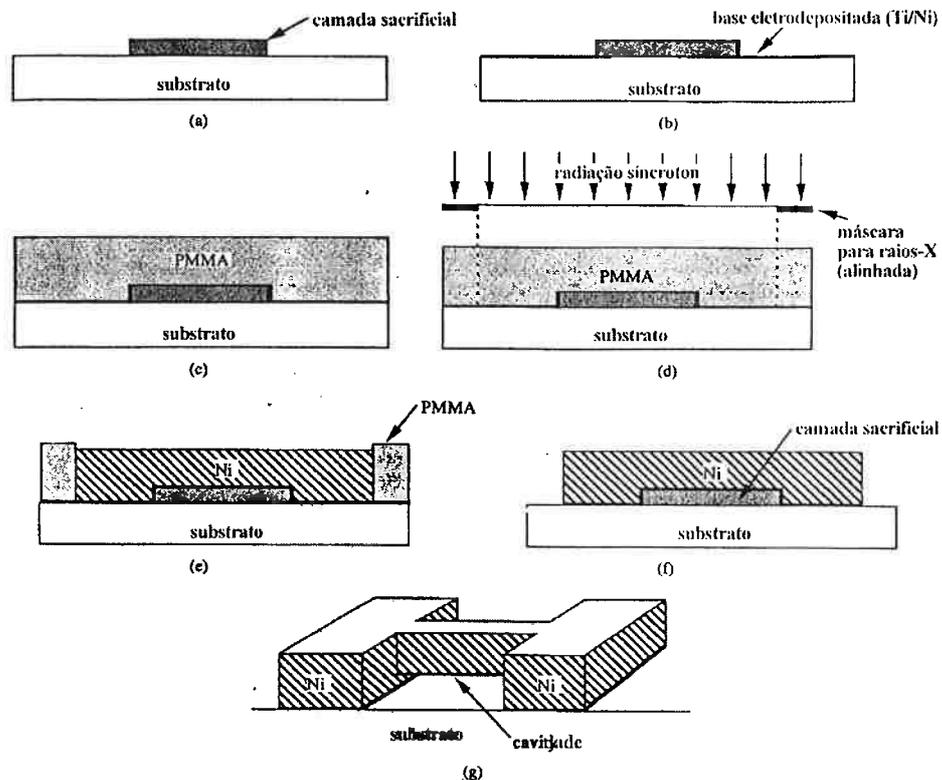


FIGURA 1.3 Visualização do processo LIGA com camada sacrificial (SLIGA). (a) Camada padrão sacrificial, (b) deposição da camada de base, (c) deposição e secagem do PMMA, (d) alinhamento da máscara de raios-x e exposição do PMMA, (e) revelação do PMMA e eletrodeposição de Ni, (f) remoção do PMMA e remoção da camada de base e (g) remoção da camada sacrificial e liberação da estrutura em níquel. Extraído da ref. [24].

1.2.2 O Processo HARMS

O processo HARMS (*High Aspect Ratio Micro Systems*) é utilizado para a fabricação de partes que podem ser empregadas em microfabricação ou sistemas que

necessitem de deposição de metais. Em comparação com o processo LIGA original, este processo apresenta um menor custo no processamento total. Baseado em uma tecnologia litográfica empregando máscaras convencionais, e utilizando resists sensíveis ao ultravioleta, é possível obter estruturas com até 300 μm de altura, e dimensões laterais de 30 μm , ou seja, razões de aspecto da ordem de 10:1. Com esse processo é possível gerar moldes para a eletrodeposição de níquel e cobre, controlando-se os seguintes parâmetros: temperatura do banho, filtração de partículas, filtração periódica de carbono ativo da degradação de orgânicos, medida do pH da solução e monitoramento da solução de níquel ou cobre da solução [24-25].

A Figura 1.4 mostra a seqüência de fabricação do processo HARMS.

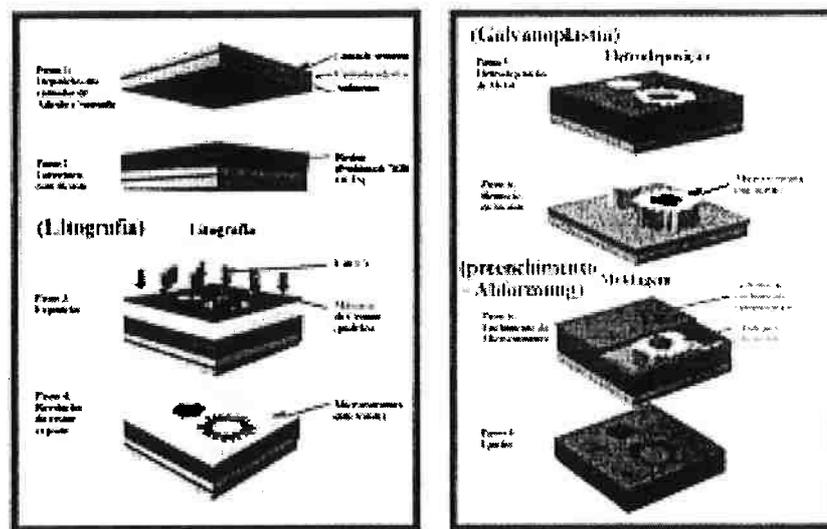


FIGURA 1.4 Seqüência de etapas de um processo HARMS. Segundo ref. [24].

A seqüência do processo HARMS (conforme a Figura 4) é:

1. Limpeza do substrato.
2. Deposição da camada de promotor de aderência.
3. Deposição da camada semente (*seed layer*) metálica.
4. Deposição do fotorresiste (*OLIN 7020*), espessura de 300 μm .
5. Exposição ao ultravioleta, dose de 150-200 mJ/cm^2 .
6. Revelação com *spray* do fotorresiste exposto.
7. Eletrodeposição do metal.
8. Remoção da camada de fotorresiste.
9. Deposição de um polímero para a fabricação do molde.
10. Remoção da estrutura metálica.

Do ponto de vista de litografia, esses dois processos são os que apresentam características diferenciadas em relação aos processos tradicionais, principalmente por utilizarem resistes espessos (acima de $10\mu\text{m}$). Outros processos litográficos empregados em MEMS são baseados na litografia óptica convencional, principalmente aqueles empregados em MEMS de superfície, e não serão aqui tratados.

1.3 Litografia para Microdispositivos Ópticos

Além de compartilhar com outros tipos de dispositivos a necessidade de elevadas razão de aspecto aplicadas a estruturas de grandes dimensões (dezenas centenas de micrômetros), microdispositivos ópticos (Figura 1.5) necessitam de relevos em degraus ou de perfil contínuo e por isso apenas técnicas litográficas que tenham a possibilidade de modular a intensidade do feixe incidente são aplicáveis. Isso descarta a litografia óptica convencional, que se preocupa apenas em mascarar ou não regiões específicas da lâmina. Por isso, para a confecção de microdispositivos ópticos, na maioria das vezes, utilizam-se técnicas de litografia por escrita direta, como a litografia por feixe de íons, litografia por laser e litografia por feixe de elétrons[3][26-28].

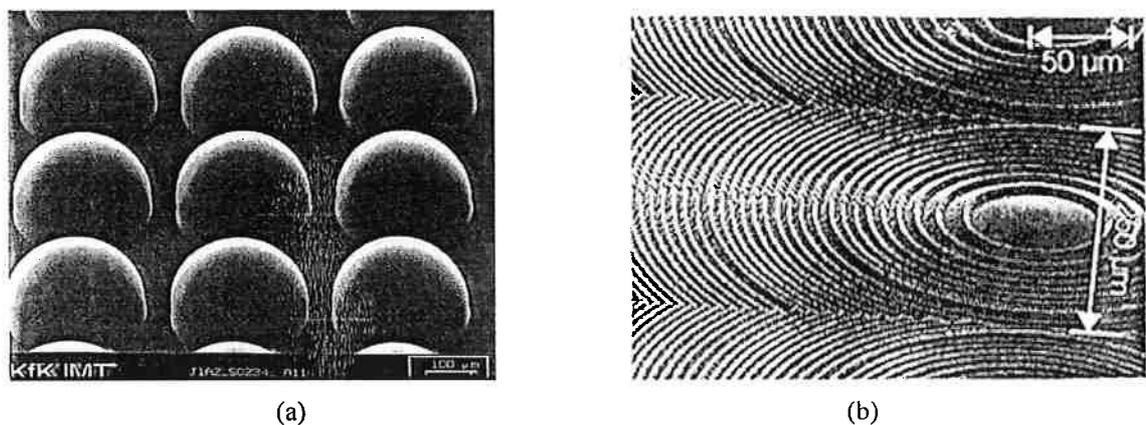


FIGURA 1.5 Exemplos de (a) Microlentes simples (refrativas) e (b) Microlentes de Fresnel (difrativas) fabricadas em resiste espesso [3].

A Tabela 1.3 compara essas técnicas de escrita direta para confecção de microdispositivos ópticos juntamente com a litografia pela técnica de máscara de tons que não é para escrita direta. Em geral, o processo de litografia por feixe de elétrons tem uma melhor resolução, pois o comprimento de onda associado aos elétrons é muito menor que o comprimento de onda da radiação ultravioleta (litografia óptica), e o feixe de elétrons pode ser eficientemente defletido.

Tabela 1.3: Comparação entre as diferentes técnicas utilizadas para fabricação de microdispositivos ópticos

Técnica utilizada	Resolução lateral	Ref.
Escrita por laser ($\lambda=442\text{nm}$)	$5\mu\text{m}$	[29]
Escrita por feixe de elétrons	$0,05\mu\text{m}$	[30]
Técnica de máscara de tons	$4\mu\text{m}$	[31]
Escrita por feixe de íons focalizado	$0,1\mu\text{m}$	[30]

Do ponto de vista de dispositivos microópticos, a litografia por feixe de íons pode ser usada tanto para a gravação direta dos traçados sobre o substrato, como para a geração de máscaras[32]. Em geral, para esta técnica, íons de baixa energia ($< 100\text{ keV}$) são usados para sensibilizar o resiste. As principais desvantagens associadas são que os íons não conseguem penetrar em todo o resiste e também que eles podem causar uma exposição não uniforme[28]. O aumento da energia cinética destes íons resolve este problema, mas pode causar danos físicos por impacto com a amostra. A litografia por feixe de íons focalizado proporciona uma precisão e resolução comparável à litografia por feixe de elétrons, com a vantagem de não apresentar o efeito de proximidade.

Já na litografia por feixe laser, os traçados são transferidos ao substrato com um laser, por escrita direta, usando-se um procedimento similar ao da litografia por feixe de elétrons. Esta técnica pode ser usada também para corrosão direta ou deposição[29]. Em relação à litografia por feixe de elétrons, sua vantagem é que não apresenta o efeito de proximidade[3]. Outra vantagem deste método é de ser capaz de remover ou depositar um material seletivamente em áreas precisas da amostra. Em geral a escrita é feita usando um laser de HeCd ($\lambda=442\text{nm}$) e um interferômetro laser que controla o posicionamento da mesa x-y na qual o substrato é colocado.

A litografia por feixe de elétrons permite que se obtenha estruturas submicrométricas e com maior resolução quando comparada às outras técnicas litográficas. A resolução alcançada pela escrita por feixe de elétrons em sistemas de pesquisa em geral está limitada pela resolução do resiste empregado. No caso da utilização de PMMA essa resolução é de cerca de 50 nm .

A litografia óptica por máscara de tons (*half-tone mask*) geralmente é usada para a exposição de grandes áreas de uma só vez, sendo baseada na litografia óptica para tecnologia planar desenvolvida para a área de microeletrônica. Embora não seja uma técnica de escrita direta, ela é muito usada para obtenção de microestruturas de relevo contínuo. Nesta técnica podem ser usados dois tipos de máscaras: A primeira é a

máscara binária de alta resolução, e a segunda é a máscara de tonalidade cinza. No primeiro caso, as máscaras binárias são usadas em um sistema de litografia por projeção (5:1). A definição dos tons cinzas é feita pela variação de tamanho ou densidade dos pontos transparentes, como visto na Figura 1.6. Logo, esta técnica emprega máscaras tradicionais, porém de alta resolução, que se aproveitam do fenômeno de difração da luz.

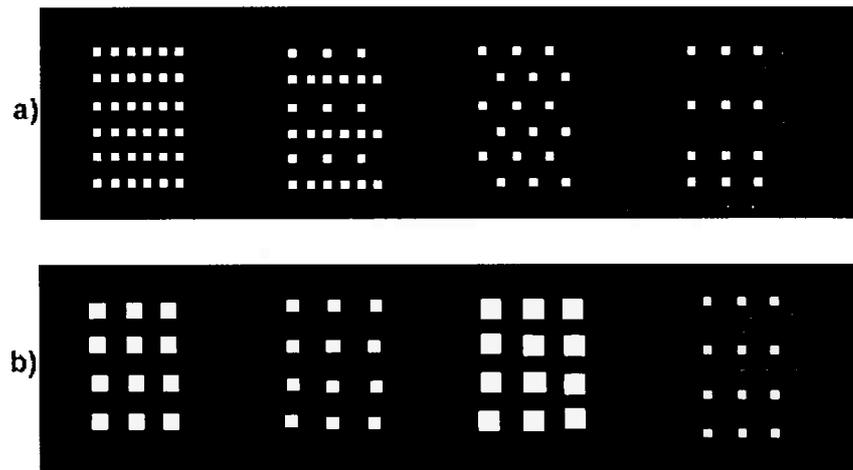


Figura 1.6: Exemplo de máscaras binárias definidas por: a) densidade dos pixels e b) tamanho dos pixels [31].

A máscara de tonalidade cinza, apresentada na Figura 1.7, é fabricada utilizando-se um vidro de borossilicato-zinco dopado com íons de prata, sensível ao feixe de elétrons com energia maior que 10 keV. Esse vidro é exposto em um sistema de escrita direta por feixe de elétrons que, de acordo com a dose, causará a mudança nas características de transmissão do vidro, gerando assim o nível de cinza do mesmo. Esses tons de cinza irão determinar a quantidade de luz que irá sensibilizar o resiste, controlando assim o perfil de profundidade final revelado, como apresentado também na Figura 7.

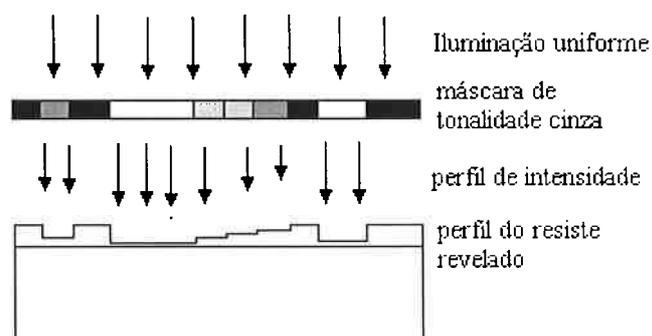


FIGURA 1.7 Litografia usando a técnica da máscara de tonalidade cinza.

Essa técnica tem-se mostrado adequada para produzir estruturas microópticas com tamanhos típicos em torno de $4\mu\text{m}$ [31][33].

1.4 Objetivos deste Trabalho

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema litográfico por feixe de elétrons para escrita direta destinado a aplicações de pesquisa em processos que utilizem resistes espessos ($> 2\mu\text{m}$) e amostras não convencionais (substratos pequenos ou espessos). Serão apresentados resultados de sua aplicação na fabricação de microdispositivos eletromecânicos e microdispositivos ópticos.

O capítulo 2 descreve o desenvolvimento do sistema, detalhando suas partes constituintes e ferramentas disponíveis. O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do processo básico de exposição de filmes espessos por feixe de elétrons e mostra a utilização de variantes desse processo na fabricação de microengrenagens e microosciladores fluídicos. O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento de um processo para obtenção de relevos contínuos em resiste espesso visando aplicações em microóptica e mostra sua utilização na fabricação de microlentes para aumentar a eficiência de conversão de microfotodetectores HMSM. O capítulo 5 apresenta possíveis encaminhamentos futuros deste trabalho.

2. Concepção e Instalação de um Sistema de Litografia para Microdispositivos

2.1 Introdução

Em um ambiente de pesquisa a flexibilidade e rapidez em testar novas possibilidades são muito mais importantes do que relação custo/benefício, produtividade e rendimento. Para litografia voltada à pesquisa isso significa que certamente alinhadoras com exposição por contato/proximidade são muito mais eficientes do que equipamentos de projeção e que equipamentos lentos, como aqueles para litografia por feixe de elétrons, podem se mostrar também muito eficientes principalmente no modo de escrita direta. Nesse modo não se necessita de máscaras, permitindo por exemplo a confecção de geometrias com qualquer tipo de traçado (não manhattan) e pode-se obter resolução nanométrica (melhor que 40nm).

Considerando-se a existência de alinhadoras ópticas em várias instituições brasileiras, observamos que essa opção encontra-se disponível e relativamente consolidada. Assim, qualquer contribuição deve-se dar no âmbito dos processos litográficos de escrita direta (sem máscara). Apesar disso, deve-se notar que aparentemente não existe no país nenhuma alinhadora óptica que esteja utilizando comprimentos de onda inferiores a 365 nm, sendo que uma opção por 248nm (ultravioleta profundo – DUV) seria interessante pois existem resistes positivos e negativos com desempenho excelente (resolução melhor que 100nm e resistentes a plasma) nesse comprimento de onda.

Para escrita direta de alta resolução a opção mais econômica é adaptar um microscópio eletrônico de varredura para realizar processos litográficos e essa é a abordagem empregada neste trabalho.

2.2 Equipamento de Escrita Direta

Considerando a existência de um microscópio eletrônico de varredura Philips modelo SEM515 no Departamento de Engenharia Eletrônica da EPUSP, optou-se por instalar um acessório de escrita direta compatível com esse equipamento. Escolheu-se o sistema Proxy-Writer da empresa Raith GmbH para tal. A partir de um software instalado em PC e uma placa especial com duas saídas D/A (x e y) de 16 bits que atuam diretamente nas correntes aplicadas às bobinas de varredura do SEM, o feixe de elétrons pode ser posicionado no campo de varredura com uma precisão de 1:65536. Na prática, para que não ocorram descasamentos entre o processo de digitalização (pixelização) real no SEM e o de projeto no software recomenda-se a divisão do campo em 50.000 pixels. Portanto, por exemplo, para campos de escrita de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ o sistema tem a capacidade de posicionamento de 2nm (1 pixel). A área total de varredura (o campo de varredura), por outro lado, é definida pelo sistema de magnificação do microscópio eletrônico de varredura e pela distância de trabalho (WD) entre coluna (lente final) e amostra. No caso do SEM515 do PSI/EPUSP, a distância de trabalho está fixada em 27mm e a magnificação pode ser ajustada em passos de $\times 2$. Isso implica em magnificações múltiplas de aproximadamente $10 \times$ como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Área dos campos de exposição em função da magnificação.

Posição da Magnificação	Magnificação	Campo (50000 px; WD = 27mm)
1	10 \times	3200 $\mu\text{m} \times 3200\mu\text{m}$
2	20 \times	1600 $\mu\text{m} \times 1600\mu\text{m}$
3	40 \times	800 $\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$
4	80 \times	400 $\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$
5	160 \times	200 $\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$
6	320 \times	100 $\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$
7	640 \times	50 $\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
8	1280 \times	25 $\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$
9	2560 \times	12,5 $\mu\text{m} \times 12,5\mu\text{m}$
:	:	:

Para que o sistema seja calibrado adequadamente, (definindo-se uma distância de trabalho e uma magnificação) é necessário a utilização de uma amostra padrão. Em nosso caso essa amostra padrão consiste em um substrato de silício de 20mm \times 20mm com tabuleiros de xadrez fabricados em filme de ouro com casas

(quadrados) de $1\mu\text{m}$. Insere-se essa amostra no SEM e, através da observação da sua imagem no PC (através da placa especial), pode-se sobrepor a imagem do tabuleiro de xadrez com o campo de trabalho do software e definir as distâncias envolvidas. Esse processo precisa ser refeito apenas quando se modifica a distância de trabalho.

Apesar da capacidade de endereçamento do sistema permitir o posicionamento do feixe eletrônico em passos de 2nm (campo de $100\mu\text{m}$), a resolução do sistema litográfico está limitada pelo diâmetro do feixe do microscópio eletrônico. Este, por sua vez, pode ser ajustado variando-se a corrente nas lentes condensadoras da coluna do SEM através de uma chave de 7 posições. A tabela 2.2 apresenta os diâmetros do feixe em função da chave de 7 posições para uma distância de trabalho de 27mm . Note-se que além da chave de 7 posições é possível fazer um ajuste fino no diâmetro/corrente do feixe através de um potenciômetro incorporado na chave seletora. Na tabela 2.2 também é calculada a corrente do feixe supondo-se que este último tenha efetivamente uma seção circular.

Tabela 2.2. Diâmetro e corrente do feixe de elétrons em função da corrente nas lentes condensadoras (chave de 7 posições).

Posição da chave seletora	Diâmetro do feixe	Corrente do feixe $\rho / J = 11 \text{ A/cm}^2$
1	11 nm	10 pA
2	13 nm	15 pA
3	27 nm	63 pA
4	67 nm	388 pA
5	134 nm	1,55 nA
6	268 nm	6,21 nA
7	670 nm	38,8 nA

Como se vê, o diâmetro do feixe é muito maior que a precisão de posicionamento do mesmo e portanto o primeiro é que limita a resolução do sistema de exposição. Conclui-se da tabela 2.2 que a máxima resolução do sistema em questão é da ordem de 20 nm .

Outro aspecto importante é que o sistema de escrita direta, por questões práticas e operacionais, limita tanto o valor máximo quanto o valor mínimo de sensibilidade dos resists que podem ser empregados. Para se determinar esses valores algumas considerações devem ser feitas. O limite superior fica muito vinculado ao tempo máximo de exposição aceitável, principalmente por questões de estabilidade da corrente (que é medida apenas no início do processo de exposição e portanto não pode ser corrigida dinamicamente) e de deslocamento do estágio devido a sua acomodação

mecânica. Na prática isso limita o processo de exposição a cerca de 1 hora (sensibilidades menores que $500\mu\text{C}/\text{cm}^2$ são aceitáveis). O limite inferior desce da corrente mínima aceitável para o processo de exposição e da velocidade máxima de varredura do feixe. A varredura do feixe é limitada a algo em torno de 100kHz. A corrente mínima é limitada pelo próprio SEM (em torno de 10pA). Esses dois fatores limitam na prática a sensibilidade inferior como da ordem de $10\mu\text{C}/\text{cm}^2$. O limite inferior é mais crítico para pesquisa pois existem resistes comerciais com sensibilidades abaixo deste valor. Embora seja possível reduzir esse limite inferior, por exemplo pulsando-se a corrente do feixe, nenhum teste nesse sentido foi realizado.

Para a exposição de um determinado dispositivo, suas geometrias são projetadas através de um software adequado, e a cada uma dessas estruturas são atribuídas doses de exposição, que podem ser endereçadas de forma arbitrária. Um computador se encarrega de transmitir essas informações juntamente com o posicionamento do feixe ao SEM. O sistema utiliza uma estratégia de escrita vetorial, com o feixe sendo ligado e desligado (*beam blanking*) por meio de sua deflexão para a posição desejada. As limitações de sistemas como este são impostas pela baixa luminosidade do feixe (filamento de tungstênio) e pela ausência de um sistema de liga/desliga eletrostático mais rápido para o feixe, o que limita consideravelmente a sua produtividade (cerca de 3 pastilhas, ou *chips* por hora).

Deve ser observado que a dose de exposição é determinada pelo tempo que o feixe fica sobre um determinado ponto da amostra. Esse tempo é a soma dos tempos de posicionamento do feixe, da transferência eletrônica dos dados, do tempo de movimentação do estágio, e o tempo para depositar a dose de exposição [34]. No caso do equipamento utilizado neste trabalho o feixe é que se movimenta por intermédio de lentes magnéticas e não o estágio. A imprecisão no valor total desse tempo muitas vezes leva a uma imprecisão da dose de exposição efetivamente empregada, sendo que flutuações de 2-3% nesse valor são consideradas normais. Para as nossas aplicações o diâmetro mínimo do feixe é de $0,01\mu\text{m}$ e máximo de $0,1\mu\text{m}$.

No caso do arranjo empregado no LSI/PSI/EPUSP (figura 2.1), para a exposição do resiste utilizamos um microscópio eletrônico de varredura da Philips modelo SEM515, e o controle do feixe para exposição é feito por um sistema externo ao SEM, obtido junto a Raith GmbH, chamado Proxy-Writer, que assume o controle do sistema de varredura do SEM. A corrente do feixe é medida com um picoamperímetro Keithley, modelo 485.

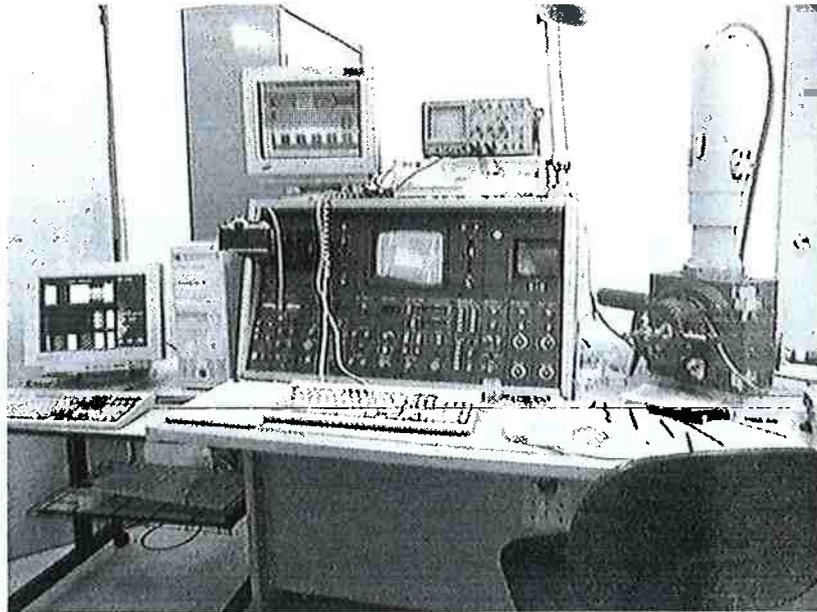


FIGURA 2.1 Microscópio Eletrônico de Varredura equipado com Sistema de Litografia por Feixe de Elétrons ProxyWriter. O monitor da esquerda apresenta os traçados a serem gerados e o monitor superior faz a aquisição das imagens já expostas e reveladas.

2.3 Resistes

Resistes são utilizados na fabricação de microdispositivos não apenas como máscaras bidimensionais, como ocorre na fabricação de CIs, mas também como camada sacrificial ou eventualmente como parte integrante do dispositivo. Assim, se analisarmos o processo LIGA descrito anteriormente, a espessura do resiste é igual a espessura do dispositivo que se deseja fabricar pois ele é utilizado como molde (réplica) para fabricação do dispositivo. No caso de microóptica, por exemplo, resistes podem ser utilizados para fabricar microlentes curvilíneas diretamente sobre eles (e assim são partes constituintes do dispositivo) ou então servem de moldes que são transferidos para a camada abaixo da camada de resiste por meio de um processo de corrosão por plasma com seletividade 1:1 (e assim são uma camada sacrificial).

Portanto, no caso de microdispositivos, a espessura e formato das estruturas na camada de resiste não são ditadas pelo desempenho litográfico mas pelas características geométricas tridimensionais desejadas. Na prática isso significa que a espessura de resiste pode-se situar entre $5\mu\text{m}$ e 1mm (comparativamente, em CIs, ela situa-se entre $0,25\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$).

Fabricantes de resistes desenvolveram formulações adequadas para essas aplicações e pode-se encontrar resistes espessos de tom positivo ou negativo, sensíveis a elétrons, raios-X, UV profundo (DUV) ou linha-g/i. Nesse tipo de resiste o principal desafio é obter paredes laterais verticais após a revelação em estruturas com razão de

aspecto (altura:largura) da ordem de 10:1 (por exemplo, um pino com diâmetro de $10\mu\text{m}$ e espessura, ou melhor, comprimento, de $100\mu\text{m}$). Em geral isso requer doses de exposição elevadas ou o uso de resistes amplificados quimicamente para expor toda a espessura do resiste. Outra possibilidade é a utilização de técnicas de imagem na superfície onde se sensibiliza apenas o topo do resiste e a seguir transfere-se a imagem assim formada para o restante da espessura do resiste por meio de revelação (corrosão) a seco.

O sistema de litografia aqui descrito emprega três tipos de sistemas de resistes: resistes amplificados quimicamente, resistes multicamadas e resistes sililados.

2.3.1 Resistes Amplificados Quimicamente

Para suplantar o problema de sensibilidade, ITO e WILLSON [35] propuseram a utilização de sistemas baseados em amplificação química semelhante aos sistemas de emulsão fotográfica baseados em haletos de prata. Nesse tipo de sistema, um único evento de radiação é utilizado como catalisador de uma série de reações químicas, não sendo consumido por estas reações. Esse sistema é de grande interesse em litografia por raios X, por feixe de elétrons e DUV, principalmente porque aumenta a sensibilidade dos resistes (todos esses sistemas empregam fontes de menor energia e portanto têm problemas de produtividade) e dá a liberdade de escolher polímeros com menor coeficiente de absorção nesses comprimentos de onda (pode-se sensibilizar resistes mais espessos e obter perfis mais adequados).

A sensibilidade acentuada dos resistes do tipo amplificado quimicamente provém da regeneração do ácido responsável pela transformação química do polímero que se torna disponível para reações adicionais. Essa taxa de regeneração é altamente dependente da temperatura em que se encontra a lâmina após a exposição do resiste e encontra-se na faixa de 800 – 1200 regenerações para resistes com apelo comercial [36].

O processo de amplificação química inicia-se com a conversão da molécula do gerador de ácido sensível à radiação (AG) em um ácido forte (AH) logo após a absorção de um fóton ($h\nu$). Essa conversão ocorre a uma taxa elevada, que depende da eficiência quântica do AG e do fluxo da radiação incidente. Aquecendo-se o filme a uma temperatura adequada, libera-se o próton do ácido forte (H^+) que por sua vez efetua uma reação de desproteção a uma taxa constante. Essa taxa é função da concentração de prótons [H^+], da temperatura e mais importante, da taxa de difusão do H^+ na matriz polimérica. Por sua vez, a taxa de difusão do H^+ depende da temperatura e da polaridade da matriz polimérica. Na própria reação de desproteção o próton H^+ é regenerado e continua disponível para reações subseqüentes, daí a natureza de

amplificação do sistema. Devido à natureza química da transformação, pode-se escolher um solvente adequado que atue apenas sobre a região exposta ou sobre a região não exposta.

Com esse tipo de resiste as fontes de energia não precisam ser muito intensas (como luz síncrotron) e assim permitem a escrita serial, como no caso de feixe de elétrons. Além disso, modelando-se adequadamente o processo é possível fabricar-se estruturas com perfis em relevo contínuo (não binário).

Escolhemos como resiste amplificado quimicamente para desenvolvimento dos trabalhos o resiste SNR200 da Shipley Inc., que é um resiste negativo que apresenta sensibilidade a elétrons em torno de $30\mu\text{C}/\text{cm}^2$ e espessura máxima em torno de $1,5\mu\text{m}$, sendo que para se trabalhar com espessuras maiores pode-se realizar várias etapas de cobertura (*spinnings*) em seqüência.

2.3.2. Resistes Multicamadas

Além de modificações na formulação do resiste, empregando-se adequadamente diversas camadas de resistes, pode-se obter resultados semelhantes. Esse tipo de proposta é genericamente chamada de processos multicamadas de resistes (*multi-layer resists* – MLR) [37]. Colocando-se, por exemplo, uma camada fina de um resiste sobre uma camada espessa de outro resiste pode-se sensibilizar apenas camada superior e seguir transferir a imagem formada na camada superior para a camada inferior por meio de revelação a seco (por plasma), garantindo um perfil vertical para o filme.

Na prática realiza-se o processo MLR de diversas maneiras, sendo que em alguns casos introduz-se uma terceira camada, intermediária, com a finalidade de melhor isolar as duas camadas originais de resiste seja por problemas de miscigenação entre elas, seja para ter-se uma máscara mais efetiva para a corrosão quando da transferência do traçado da camada superior para a inferior[38]. Embora este procedimento obtenha resultados melhores, a complexidade adicional é muito grande, podendo facilmente duplicar o número de etapas e o tempo de processamento, razão pela qual se evita a sua utilização em processos de produção, tendo no entanto boa aceitação em pesquisa. Deve-se observar também que este tipo de procedimento é adequado para se fabricar estruturas que requeiram paredes laterais verticais mas é pouco adequado quando se deseja modelar o perfil, como no caso de microlentes.

Neste trabalho empregou-se um processo tripla camada composto por ARP-322 da All Resist nas camadas inferior e superior e alumínio como camada

intermediária. Empregou-se também um processo dupla camada envolvendo resiste ARP-322 ou SNR200 e alumínio.

2.3.3 Resistes Sililados

A litografia em multicamadas é um exemplo do processo chamado de técnica de imagem na superfície (*Top Surface Imaging - TSI*) [39-41]. Os processos TSI têm por filosofia utilizar a camada sacrificial do resiste para fixar os traçados. A superfície sensibilizada do resiste é utilizada para transferir os traçados para o corpo do resiste, conseguindo assim uma etapa litográfica com alta resolução e com grande profundidade de foco [42].

A sililação é um caso particular da TSI, que é definida como a substituição de um átomo de hidrogênio ativo de uma base de *Bronsted-Lowry* (-OH, -NH, -SH) por um átomo de silício (-OSi, -NSi, -SSi) [43]. A incorporação de Si ao resiste ocorre de maneira seletiva, dependendo da disponibilidade de sítios onde a reação possa ocorrer e da difusividade do Si no resiste [42]; que é função, por exemplo do resiste ter sido exposto sem ligações cruzadas (*crosslinking*) ou não (ligações cruzadas). A vantagem dessa técnica é que se pode utilizar apenas a camada de resiste espesso, pois ela recebe diretamente a exposição litográfica, incorpora seletivamente o silício e por fim é revelada a seco (com plasma de oxigênio).

Neste caso utiliza-se apenas uma camada de resiste que é exposta da forma convencional. A seguir, por meio de uma etapa adicional, incorpora-se seletivamente, *i.e.*, incorpora-se ou nas regiões expostas ou nas regiões não expostas, um composto capaz de inibir a corrosão a seco daquela região. Este composto incorpora-se idealmente apenas nos 20-30nm da superfície superior do resiste. Assim, obtém-se o desempenho de um processo dupla camada empregando-se apenas uma camada de resiste.

A etapa adicional que é capaz de inibir a corrosão a seco, é conhecida como etapa de sililação (*silylation*) pois incorpora especificamente silício, embora outros elementos tais como In ou Ti tenham sido utilizados. A incorporação pode ser realizada diretamente por implantação, por fase gasosa ou por fase líquida. O processo de sililação [44-46] ocorre por difusão do gás ou líquido [47] para a superfície da lâmina e desta para dentro do resiste. Durante a sililação, três mecanismos ocorrem [48]: o relaxamento do resiste, a variação na difusividade do agente promotor das ligações cruzadas e o tensionamento devido ao inchamento não uniforme do resiste. Estes mecanismos contribuem para que ocorram divergências na lei clássica de Fick

para a difusão. Uma clara diferença que se observa é a formação de uma borda irregular nas áreas onde ocorre a sililação.

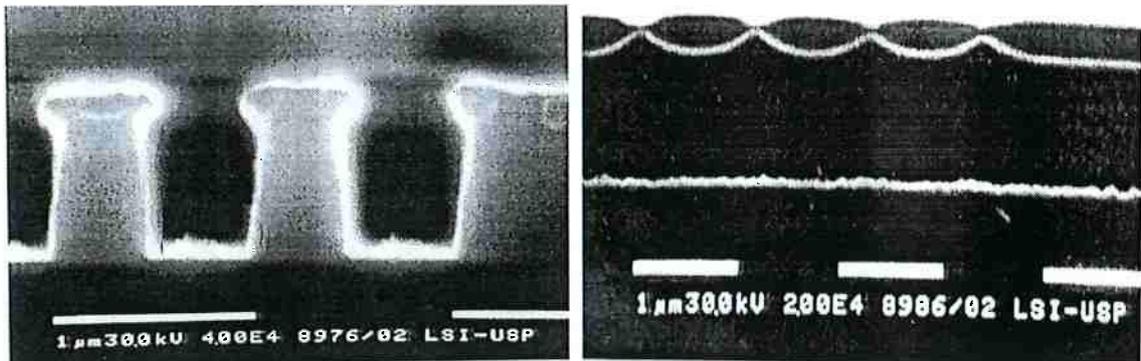


FIGURA 2.2 Fotos obtidas em um Microscópio de Varredura. Formação de uma borda irregular nas áreas onde ocorre a sililação. a) resiste sililado antes da etapa de revelação e b) resiste sililado após a etapa de revelação seca.

Na literatura se encontram vários exemplos do processo de sililação sob diferentes acrônimos: DESIRE (*Diffusion Enhanced Silylation Resist*) [49-54], PRIME (*Positive Resist Image by dry Etching*), Si-CARL (*Silicon Chemical Amplification of Resist Lines*), SUPER (*Submicron Positive dry-Etch Resist*) e SIMPLE (*Silylation resist using chemical Amplification for Electron Beam*). A maioria destes processos são variações do DESIRE e portanto, a discussão se concentrará nele [48].

O processo DESIRE é utilizado em produção desde o final dos anos 80 na Texas Instruments para DRAMs. Nesse processo, o resiste *Plasmask* (um resiste negativo a base de *novolac*, desenvolvido especialmente para corrosão por plasma) é exposto a uma etapa de sililação a temperatura elevada (de 140 a 170° C) e o silício é seletivamente incorporado nas partes expostas do resiste DQN. Para a incorporação do silício à base de *novolac* do resiste, pode ser usado o HMDS (HexaMetilDiSilazana), que pode ser empregado em fase líquida ou fase vapor. No caso do trabalho aqui proposto, será utilizado como agente de sililação o HMCTS (HexaMetilCicloTriSilazana) em fase líquida [48].

Sem dúvida a técnica DESIRE (*diffusion enhanced silylated resist process*) introduzida por F. COOPMANS e B. ROLAND[55]. Nesta técnica, apresentada na figura 2.3, a lâmina é recoberta com um resiste baseado em DQN especialmente desenvolvido para corrosão a seco (*Plasmask*[®]) que pode ser exposto em linha-g, linha-i ou DUV.

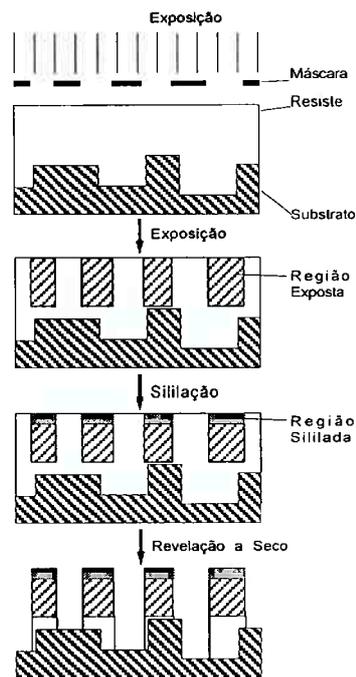


FIGURA 2.3 Sequência de etapas do processo DESIRE. (FONTE: F. COOPMANS[55])

Como a formação da imagem ocorre apenas na superfície do resiste, a dose de exposição é menor que a normal, aumentando a produtividade do processo. Para exposição na linha-g ou linha-i[56], o composto fotoativo (*photoactive compound* – PAC) é transformado em ácido (*indene carboxylic acid* – ICA) nas regiões expostas. A seguir é feito o aquecimento de pré-sililação (*pre-silylation bake* – PSB) onde o ICA dessas regiões decompõe-se por não ser estável a temperaturas elevadas e o PAC das regiões não expostas reage com o novolac para formar um éster, resultando em ligações cruzadas PAC–novolac. Durante o aquecimento de sililação (*silylation bake* – SB) ocorre a difusão preferencial nas áreas expostas do resiste do agente de sililação (silício) que reage com os grupos hidróxi da resina novolac formando compostos de silício. Nas regiões não expostas, a cadeia PAC–novolac funciona como eficiente barreira de difusão do agente de sililação e assim a formação de compostos de silício é muito reduzida. Após a etapa de sililação, um plasma de oxigênio encarrega-se de revelar a imagem, removendo o resiste das regiões não expostas (que não contém silício). Já nas regiões expostas, devido à presença de silício que não forma produto volátil com o oxigênio, a remoção de resiste é obstruída. Empregando-se este processo, o controle de dimensões e os problemas de DOF são reduzidos sendo que resolução e latitude de processo são aumentadas devido a combinação da técnica de imagem na superfície e revelação a seco.

Pode-se realizar a sililação também através de uma etapa líquida. A sililação líquida é vantajosa por oferecer uma maior incorporação de silício que por vapor. Além disso, a sililação por fase líquida reduz o inchamento lateral durante a sililação (observações experimentais sugerem que a sililação líquida apresenta um inchamento vertical mais pronunciado do que a sililação por vapor e um inchamento lateral mínimo se comparado à sililação por vapor) e reduz também o problema de transbordamento, devido ao refluxo do resiste sililado (*overflow*).

Neste trabalho sililou-se o resiste ARP-322 de camada espessa (cerca de 20mm) para fabricação de dispositivos microeletromecânicos.

O processo de sililação requer uma caracterização mais detalhada para o seu desenvolvimento do que os processos citados anteriormente. Assim, no caso da sililação, a análise da incorporação de silício (profundidade e concentração) no resiste foi feita por espectroscopia de retroespalhamento de Rutherford (*Rutherford Backscattering Spectroscopy - RBS*) [57] ou por espectroscopia de infravermelho empregando transformada de Fourier (*Fourier Transform InfraRed Spectroscopy - FTIR*) [58-59].

2.4 Equipamentos de Preparação e Revelação de Resistes

2.4.1 Prato Giratório

Embora conceitualmente simples, a etapa de espalhamento de resiste para obter uma cobertura com filme fino (*spin coating*) requer uma série de cuidados. Em primeiro lugar, para se obter camadas mais espessas em geral a viscosidade dos resistes aumenta e o processo de secagem é mais crítico. Além disso, como a finalidade é desenvolver um sistema visando aplicações em microdispositivos (que em muitos casos não emprega o silício como substrato) e também para fins de pesquisa, considerou-se oportuno desenvolver um trabalho visando a utilização de pequenas amostras e substratos mais pesados e não apenas de lâminas de silício.

Definiu-se inicialmente o equipamento de espalhamento a ser adquirido/empregado. Escolheu-se o *spinner* modelo P6712 da *Special Coating Systems (SCS) Inc.*, que permite trabalhar com lâminas e substratos pesados (figura 2.4a), sendo que se desenvolveu suportes para pequenos substratos quadrados de 10mm, 15mm e 20mm (figura 2.4b). Esse equipamento permite trabalhar com velocidades de rotação de

100rpm até 8000rpm (o que em princípio permite obter filmes espessos) e é programável, permitindo seqüências com até três velocidades de rotação distintas.

FIGURA 2.4 (a) Equipamento de espalhamento de resiste modelo SCS-P6712; (b) detalhe dos suportes desse sistema.

A escolha por pequenos substratos quadrados de 10mm, 15mm e 20mm (figura III.b) está ligada ao deslocamento máximo da mesa do SEM (20mm) e ao fato de que normalmente os dispositivos a serem fabricados possuem dimensões menores que 10mm. Outro aspecto importante é que embora relativamente caros (cerca de US\$ 1000,00/l), resistes avançados como os aqui empregados requerem cerca de 0,3 ml por amostra quadrada, diferentemente de lâminas de 100mm que requerem cerca de 5 ml, portanto uma economia de cerca de 10 vezes.

2.4.2 Sililação

Empregou-se sililação úmido para realização deste trabalho, utilizando-se uma solução de 100 ml de 70% de xileno, 25% de PGMEA (PropilenoGlicolMetilEterAcetato) e 5% de HMCTS (HexaNMetilCicloTriSilazana) [48].

A solução é mantida a uma temperatura controlada, entre 40°C e 80°C, e a amostra é mergulhada por tempos que variam entre 1 minuto e 5 minutos. Após esta seqüência, a amostra encontra-se em condições de ser revelada.

2.4.3 Revelação Seca

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de configuração de equipamentos de corrosão por plasma: o sistema tipo RIE (*Reactive Ion Etching*) e o sistema ICP (*Inductively Coupled Plasma*).

O sistema tipo RIE é o sistema mais utilizado na indústria de microeletrônica e possibilita um controle preciso da anisotropia de revelação (corrosão) gerando conseqüentemente perfis laterais verticais. Por outro lado, o sistema ICP gera plasmas de maior densidade que o RIE permitindo manter a alta anisotropia e elevar a taxa de revelação mantendo-se a seletividade do processo. Além disso, seu custo é menor se comparado com outros sistemas de corrosão por plasma de alta densidade (por exemplo o sistema *Electron Ciclotron Ressonance-ECR*) [60].

A figura 2.5, mostra um esquema do equipamento de corrosão por plasma tipo RIE utilizado neste trabalho e desenvolvimdo durante o trabalho de mestrado deste candidato [61].

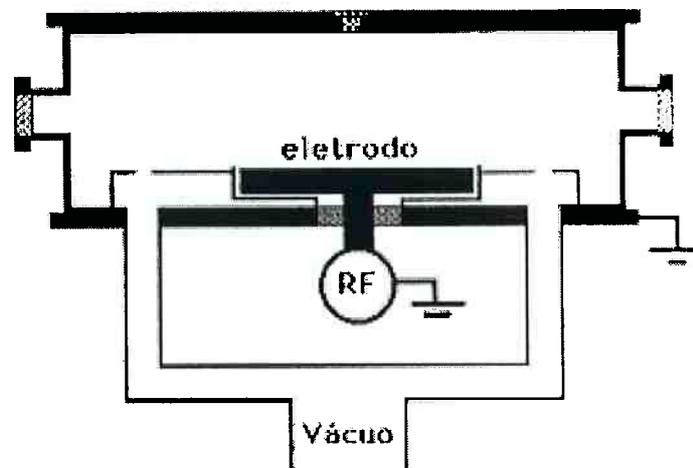


FIGURA 2.5 Esquema da configuração do equipamento de corrosão por plasma tipo Reactive Ion Etching –RIE, empregado neste trabalho.

Os equipamentos de corrosão por plasma acoplados indutivamente (ICP) são menos utilizados industrialmente. Neste tipo de equipamento uma bobina é acoplada a um equipamento de configuração tipo RIE. Desta forma, aplicando-se potência na bobina e no eletrodo, temos um equipamento de corrosão por plasma tipo ICP. A figura 2.6, mostra um esquema de um equipamento de corrosão por plasma de configuração tipo ICP.

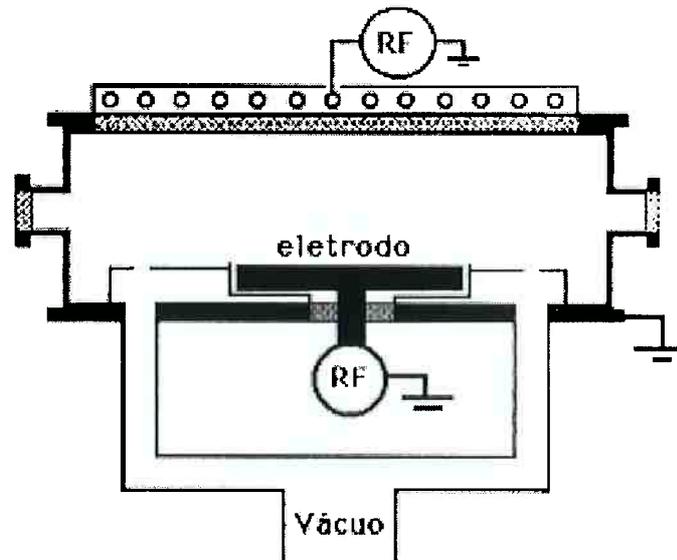


FIGURA 2.6 Esquema da configuração do equipamento de corrosão por plasma tipo Inductively Coupled Plasma – ICP, empregado neste trabalho. Extraído da ref. [60].

Neste tipo de equipamento, cria-se um campo eletromagnético que gera as espécies reativas e é separado do potencial que atrai essas espécies para que ocorra a corrosão, ao contrário do equipamento RIE. Assim, os equipamentos tipo ICP possuem direcionalidade dos íons independente dos plasmas gerados, aumentando o ataque iônico. Por outro lado, a densidade do plasma é controlada pela bobina interna que faz os elétrons percorrerem uma trajetória em forma de espiral na câmara de processo aumentando a probabilidade dos elétrons e partículas ionizadas se encontrarem com outras espécies, contribuindo para que ocorra o aumento do ataque iônico.

Principalmente quando deseja-se revelar resistes espessos as taxas de revelação devem ser elevadas para que não se aqueça a amostra e se danifique o resiste. Além disso deve-se garantir que os íons reativos alcancem com direcionalidade toda a espessura do resiste, o que normalmente requer pressões entre 1mTorr e 10mTorr. Ao contrário do RIE tradicional, o equipamento ICP apresenta essas duas características e por esse motivo é a configuração de escolha nesse tipo de processo.

2.5 CAD para confecção de Layouts

O software de exposição utilizado neste trabalho, *ProxyWriter*, é acompanhado de um software de edição de layouts chamado simplesmente de *Proxy*. O *Proxy* permite a criação de estruturas retangulares e não retangulares como círculos, toróides e espirais. Permite também a leitura dos formatos dxf e cif. Apesar da importação desses formatos não ser automaticamente compatível, algumas poucas manipulações permitem por

exemplo que se leiam arquivos gerados pelo *magic*, pelo *winlasi* e pelo *microwind* incluindo-se a importação da estrutura de camadas (*layers*) associadas. Por outro lado a edição de geometrias internamente ao *Proxy*, não permite manipulações como replicar e mover estruturas de maneira simples. Assim, a edição de estruturas não é um processo de todo simplificado mas de acordo com a aplicação (tendo-se em mente o trabalho cooperativo) pode-se estabelecer um procedimento adequado de intercâmbio de arquivos. Como exemplo, a figura romulo apresenta uma estrutura gerada inicialmente no *microwind2* e importada corretamente para o *Proxy/ProxyWriter*.

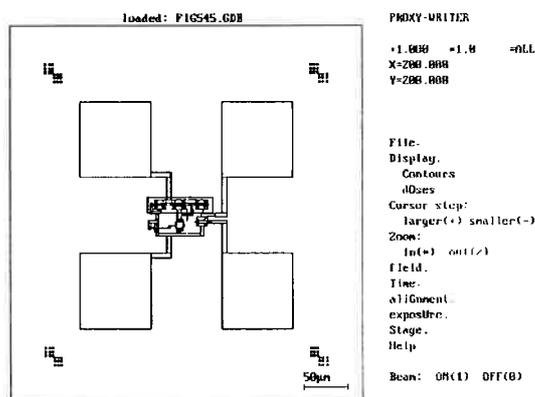


FIGURA 2.7 Exemplo de layout gerado conjuntamente pelo *Microwind2* e pelo *Proxy*.

2.6 CAD para simulação da etapa de litografia

2.6.1 O módulo de correção de efeito de proximidade do *ProxyWriter*

O software *ProxyWriter* possui um módulo de correção de efeito de proximidade que, a partir do estabelecimento dos parâmetros α , β e η da função proximidade dupla-gaussiana [proximidade] é capaz de gerar as diferentes doses em uma estrutura que vão dar origem às geometrias desejadas após a exposição e revelação, como exemplificado na figura 2.8.

(a)

(b)

FIGURA 2.8 (a) Estrutura original sem correção de efeito de proximidade, dose homogênea de $100\mu\text{C}/\text{cm}^2$; (b) Estrutura com correção de efeito de proximidade, doses de acordo com o cálculo do programa.

2.6.2 O Software CASINO

Além da correção de efeito de proximidade, que emprega a função dupla-gaussiana para determinar as doses locais necessárias e é um modelo analítico baseado em constantes empíricas, pode-se recorrer à simulação do processo de exposição e revelação das estruturas com base em fundamentos físicos mais completos associado ainda a algumas constantes empíricas. Isso permite prever o perfil final das estruturas obtidas no resiste, o que não pode ser feito pelo modelo de correção de efeito de proximidade. Para fazer essa simulação utilizou-se o software CASINO (Cambridge Algorithms for Scattering Interactions and Numerical Optimisation) da Leica Lithography Systems Ltd.

CASINO é um programa que emprega o método de Monte Carlo. Ele simula a trajetória do feixe de elétrons em estruturas que consistam de uma ou mais camadas de diferentes materiais, registrando a energia que os elétrons dissipam ao longo da trajetória. Essa distribuição de energia dissipada é função de vários parâmetros que podem ser alterados no programa, tais como tipo de resiste e substrato, espessura do resiste e do substrato, energia e forma do feixe de elétrons. O simulador faz uso da equação diferencial de seção transversal de Rutherford e a aproximação de atenuação contínua de Bethe (*continuous slowing down*)[62]. O programa pode armazenar os resultados em duas ou três dimensões, e ainda, os efeitos dos elétrons secundários (energia < 100 eV) podem ser incluídos através do método de seção de corte diferencial de Moller para calcular esta perturbação. O simulador produz uma grande matriz para representar a energia dissipada através da camada de resiste. Não há virtualmente nenhum limite para o tipo de resiste e substrato que podem ser usados na simulação, embora tais parâmetros possam influenciar no tempo de simulação.

O tempo de simulação dependerá do tipo de material escolhido, sua espessura, o número de elétrons simulados, o tipo de simulação e a capacidade de processamento do computador podendo variar de 30 minutos para muitos dias.

O tipo de material é escolhido através de uma lista que o próprio simulador oferece, e pode ser facilmente estendida pela inclusão de novos materiais bastando para isso informar a composição e densidade do material. A amostra é construída camada por camada em cima do substrato, que por sua vez também pode ser qualquer tipo de material, e todas essas informações são armazenadas na forma de uma biblioteca. O simulador registra a energia dissipada quando há a incidência de um feixe com um número conhecido de elétrons e com formato de uma função delta (diâmetro infinitesimal). Contudo, na prática, os traçados são escritos usando um feixe de elétrons com diâmetro finito (distribuição espacial gaussiana). Para obter essa distribuição

gaussiana é necessário fazer a convolução do feixe de função delta com a função gaussiana. Os resultados representam a energia dissipada pelos elétrons para um feixe gaussiano incidente. Essa convolução é incluída como parte subsequente nos programas de exposição. A figura 2.9 mostra as seqüências possíveis no software CASINO.

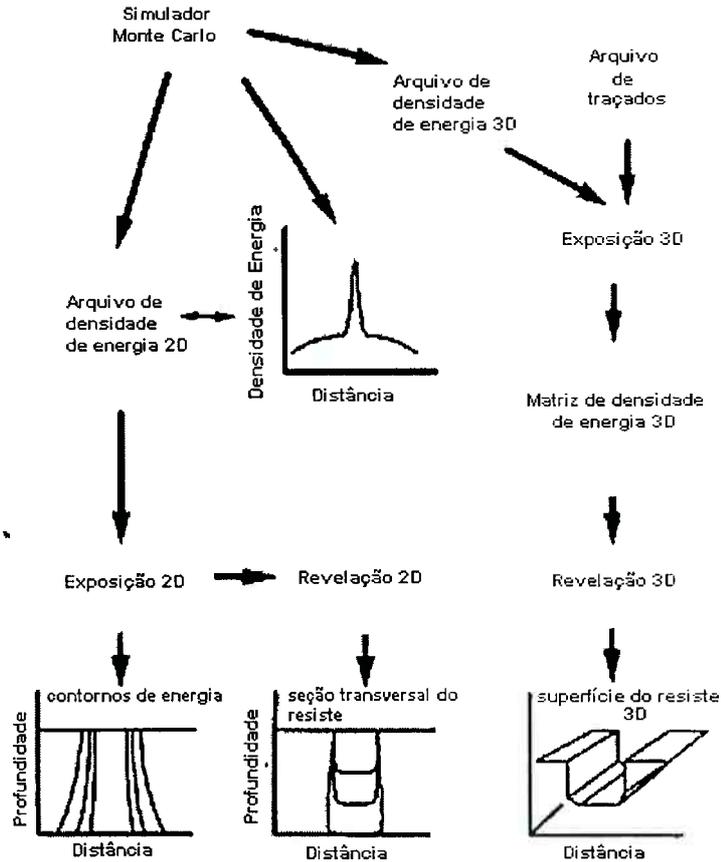


FIGURA 2.9 Seqüência de simulações que podem ocorrer na simulação de Monte Carlo.

Em nosso caso, geramos o arquivo de densidade de energia 2D através do simulador usando este arquivo no programa de revelação 2D.

2.6.2.1 Simulando a etapa de exposição

Há duas versões do programa de exposição, onde podemos trabalhar em duas ou três dimensões respectivamente. O simulador de exposição em *duas dimensões* é usado para estudar os perfis de seção transversal dos traçados de linhas paralelas. Os traçados simulados podem ser linhas isoladas, múltiplas linhas ou padrões arbitrários. Parâmetros como diâmetro do feixe, número de passos do feixe, largura de linha e dose podem ser especificados de acordo com o desejado.

O simulador de exposição em *três dimensões* pode simular a escrita de um polígono em três dimensões usando um feixe gaussiano. O programa é baseado em um editor gráfico de traçados que permite a simulação com diferentes diâmetros de feixe e doses sobre um número arbitrário de polígonos. Algoritmos recentemente desenvolvidos permitem a simulação da exposição em grandes áreas em três dimensões, nas quais o efeito de proximidade pode ser determinado facilmente.

2.6.2.2 Simulando a etapa de revelação

Nessa etapa o programa simula a seqüência exposição e revelação da camada de resiste, permitindo ao usuário estudar a influência nos perfis do resiste entre a dose e o tempo de revelação em duas ou três dimensões. O programa de simulação em 2D incorpora os algoritmos de exposição da simulação 2D de forma que os traçados possam ser expostos e revelados em uma única etapa. O programa em 3D utiliza os resultados da simulação 3D de exposição. Em ambos os casos, o perfil do resiste pode ser examinado em intervalos de tempo definidos através do processo de revelação. O simulador pode também trabalhar com múltiplas camadas de diferentes resistes e diferentes tipos de revelador. A figura 2.10 mostra um exemplo das simulações 2D que foram realizadas.

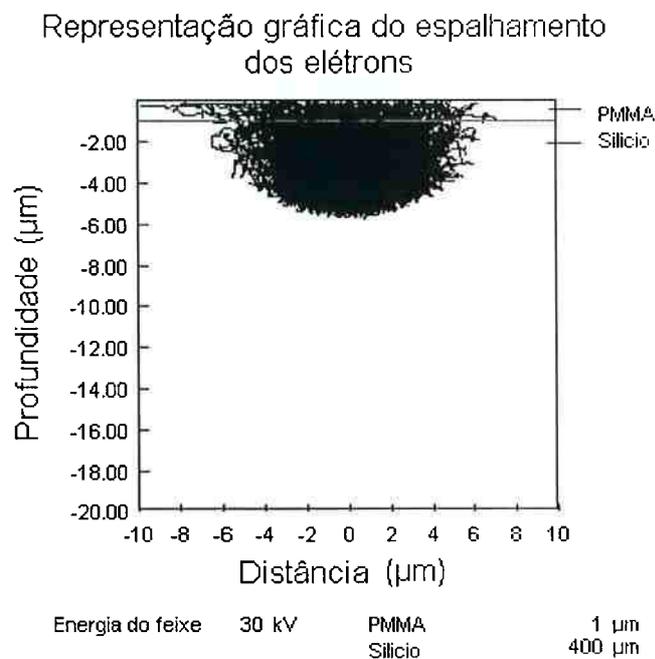


Figura 2.10 Simulação do comportamento de um feixe de elétrons de uma função delta com energia de 30 keV dentro de uma camada de 1 μm de PMMA.

A etapa de revelação também pode ser simulada (figura 2.11), permitindo assim estudar a influência entre a dose e o tempo de revelação sobre o perfil

do resiste. Para que se possa fazer a simulação é necessário conhecer primeiramente o comportamento global do resiste nas etapas de exposição e revelação. Para isso deve-se gerar um arquivo característico de revelação do resiste através das curvas de contraste obtidas. As curvas de contraste são obtidas expondo-se várias amostras, gerando estruturas que podem ser quadrados, onde em cada um desses quadrados será usada uma dose de exposição específica.

Após a revelação em um solvente adequado, mede-se a profundidade revelada utilizando, por exemplo, um perfilômetro. Obtém-se assim os valores de profundidade revelada em função da dose de exposição. Com esses dados pode-se obter o valor de solubilidade do resiste, que será de grande importância para a geração do arquivo característico do resiste.

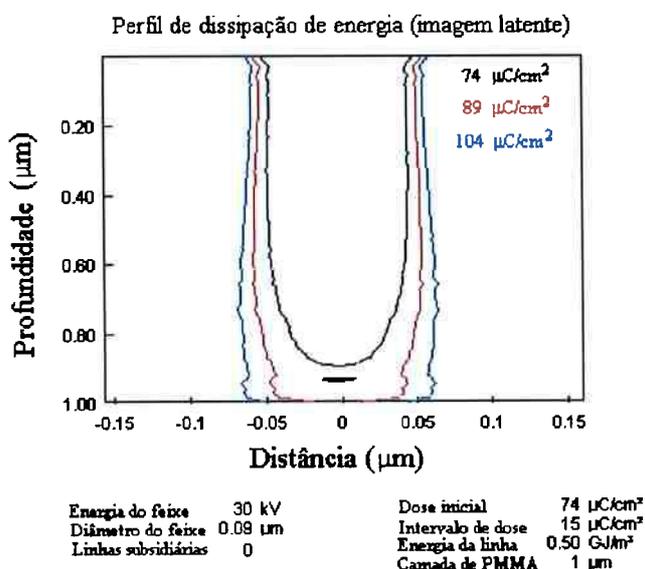


FIGURA 2.11: Perfil de distribuição de densidade de energia dissipada na camada de PMMA, para um feixe de 30 keV de energia e dose de 100 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ (resiste exposto e não revelado).

2.7 Conclusões

Com o estabelecimento do sistema aqui descrito, composto de um equipamento de exposição para escrita direta por feixe de elétrons baseado em SEM, por equipamentos acessórios (como prato giratório) adequados ao uso de amostras não convencionais como substratos pequenos, espessos ou pesados, por ferramentas de edição/importação de layouts e por ferramentas de correção de efeito de proximidade/simulação de perfis, estabeleceu-se a base sob a qual pode-se desenvolver processos litográficos não convencionais para a fabricação de microdispositivos eletromecânicos e ópticos, como será mostrado nos capítulos seguintes.

3. Litografia para Microdispositivos Eletromecânicos

3.1 Introdução

Atualmente, as etapas de processo de microeletrônica tradicional são utilizadas em outras áreas de aplicações. Em particular, essas etapas são utilizadas na fabricação de microdispositivos eletromecânicos (*MicroElectroMechanical Systems-MEMS*) [2], tais como microssensores, microatuadores e microengrenagens, que têm sido cada vez mais utilizados em eletrônica de consumo, eletrônica automotiva e em medicina. A razão para utilização da microeletrônica e mais precisamente da tecnologia de silício para essa finalidade é a disponibilidade de etapas e processos maduros e a considerável redução de custos, quando comparada a formas tradicionais de fabricação de sensores e atuadores.

Por outro lado, é claro que tais processos e os equipamentos nele utilizados devem ser modificados para se adequar às novas especificações solicitadas. Atualmente é considerado crucial para o avanço e maior uso da tecnologia MEMS o aprimoramento dessas etapas [4].

Alguns dos problemas relacionados com a etapa litográfica para a fabricação de microdispositivos eletromecânicos (MEMS) são: (a) as dimensões laterais mínimas para MEMS giram em torno de 100 μm , cerca de 50 vezes maiores que as tradicionais (CIs), sendo que a área dos dispositivos é uma ordem de grandeza maior, (b) as profundidades que devem ser corroídas podem ser cerca de 10 vezes maiores – isto se traduz em etapas litográficas e de corrosão com especificações bastante distintas: não há a preocupação com alta resolução, porém a capacidade em resolver estruturas com elevadas razões de aspecto (isto é, a razão entre a profundidade a ser corroída e a largura da estrutura podem ser da ordem de 10 ~50:1) é fundamental – e (c) o controle das dimensões obtidas (controle de dimensões críticas) pode ser tão ou mais exigente que o tradicional, havendo casos em que a dimensão crítica deve ser controlada em 0,25% (por exemplo, produzir uma estrutura com largura de 100 μm e tolerância de 0,25 μm).

Neste capítulo inicialmente será apresentado o desenvolvimento de um processo de fabricação de traçados com largura mínima de 2 μm em resistes espessos (cerca de 22 μm), utilizando-se tanto resistes multicamadas como um processo de sililação (que é uma etapa da técnica de imagem na superfície) e os respectivos processos de revelação seca. A seguir serão mostradas duas aplicações (fabricação de microengrenagens e de microosciladores fluídicos) que empregam variantes desse processo.

3.2 Procedimento Experimental

O trabalho experimental apresentado neste capítulo compreendeu a caracterização do resiste espesso AR-P 322 e sua utilização juntamente com as técnicas de imagem na superfície e de revelação seca. Este resiste óptico espesso mostrou ser sensível à exposição por feixe de elétrons e permitiu a incorporação de silício em sua camada superficial por meio da imersão das amostras em uma solução química aquecida (etapa de sililação).

3.2.1 Caracterização da Espessura do Resiste

Para realização da etapa experimental empregou-se como substrato lâminas de silício de 75mm de diâmetro, tipo *n*, orientação cristalográfica: $\langle 100 \rangle$ e resistividade de 1-20 Ω/cm . Convém mencionar que o tipo de dopagem do substrato utilizado para as etapas de processos empregadas neste trabalho não afeta as características das estruturas geradas com resiste sobre o substrato.

Antes de serem processadas, as lâminas foram submetidas às seguintes etapas de limpeza química:

- Enxágüe em H_2O deionizada (DI - 18 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$) (durante 5 minutos),
- $2 \text{H}_2\text{SO}_4 + 1 \text{H}_2\text{O}_2$ (durante 10 minutos),
- Enxágüe em H_2O deionizada (DI - 18 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$) (durante 5 minutos),
- $20 \text{H}_2\text{O} + 1 \text{HF}$ (durante 30 segundos),
- Enxágüe em H_2O deionizada (DI - 18 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$) (durante 2 minutos),
- Secagem com N_2 .

A cobertura da lâmina com resiste foi feita da seguinte forma:

- a) Inicialmente, a lâmina é presa ao prato giratório pelo sistema de vácuo que compõe o *spinner*,
- b) Em seguida, é depositado sobre a lâmina álcool isopropílico (para a desidratação da lâmina). Em seguida o *spinner* é rotacionado durante 40 segundos, espalhando o álcool por sobre a superfície da lâmina,

- c) Logo em seguida, é depositado o fotorresiste, de modo que a quantidade de resiste depositado cubra 75% da superfície da lâmina,
- d) O *spinner* é rotacionado durante 40 segundos e o fotorresiste é espalhado sobre toda a lâmina.

Após a etapa de deposição, é feita uma cura a 105° C, durante 90 segundos, para a eliminação de parte do solvente contido no fotorresiste, em placa quente (*hot plate*).

A seguir é gerado um degrau (parte do filme de resiste depositado é removido), para que possa ser possível a medida desse degrau em um perfilômetro. Desta forma, podemos medir a espessura do filme depositado sobre as lâminas.

A geração do degrau é feita com um banho parcial (só uma parte da lâmina é imersa no banho) no revelador positivo AR-300-26 da *All Resist GmbH* (puro). Desta forma, o fotorresiste imerso no revelador será removido. A seqüência utilizada é a seguinte:

- imersão parcial da lâmina no revelador AR-300-26 (puro), durante 2 minutos,
- interrupção em H₂O,
- enxágüe em H₂O,
- secagem com N₂.

A medida da espessura do fotorresiste (altura do degrau) foi feita com um perfilômetro (*DEKTAK 3030 da Sloan*), em cinco pontos diferentes ao longo da superfície da lâmina. A espessura usada é a espessura média. Com isso, foi obtida a curva da espessura do fotorresiste em função da velocidade de rotação do *spinner*, figura 3.1.

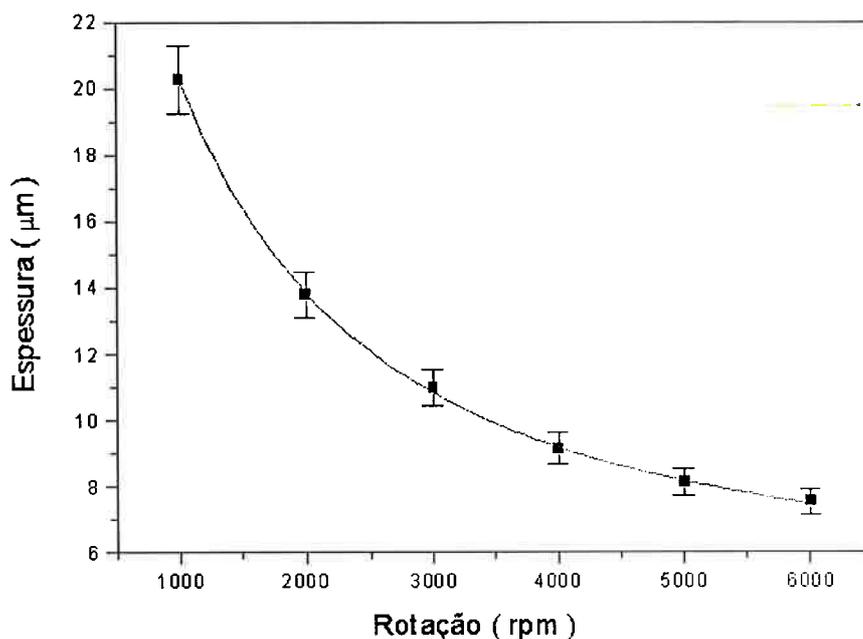


FIGURA 3.1 Gráfico da Espessura do fotorresiste depositado, em função da velocidade de rotação do spinner.

Como era esperado, quanto menor a rotação do *spinner*, mais espesso é o filme depositado sobre a amostra, e segundo a literatura, pode-se ajustar esta curva pela seguinte expressão:

$$t = 980,7 / \omega^{0,5616}$$

onde:

t = espessura do filme de fotorresiste depositado.

k = constante de proporcionalidade (que depende da viscosidade do resiste).

ω = velocidade de rotação do *spinner*.

Após determinarmos a espessura do fotorresiste depositado, verificamos a possibilidade de se expor esse resiste por feixe de elétrons (lembrando que esse o AR-P 322 é um resiste óptico). Para isso, realizamos a exposição por feixe de elétrons, a revelação por via úmida e medimos a espessura removida por perfilometria.

Observamos um problema associado à preparação da amostra para a revelação (etapa de cura) que foi o aparecimento de bolhas no fotorresiste após a revelação devido ao solvente não sido completamente eliminado do fotorresiste (figura 3.2) quando empregamos um aquecimento para evaporação do solvente durante 90 segundos a uma temperatura de 105° C.

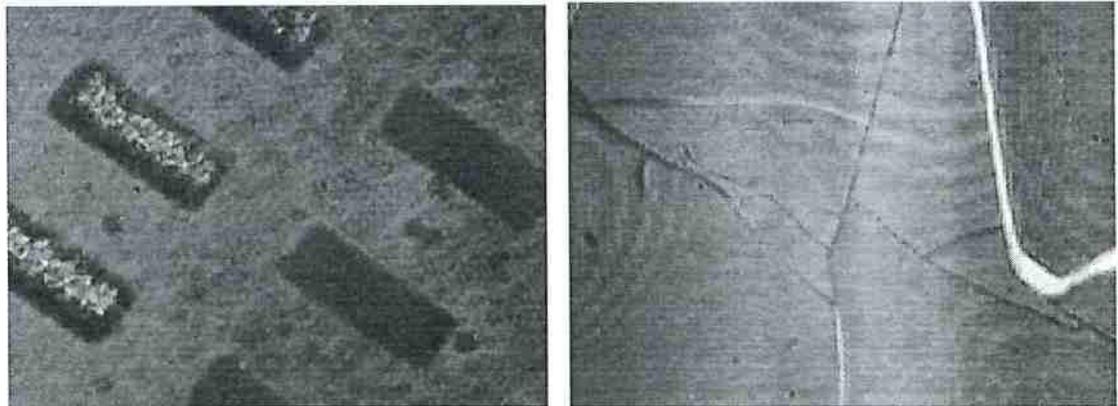


Figura 3.2 Fotos feitas com o auxílio de um Microscópio Óptico e um sistema de aquisição de imagens. (a) lâmina com fotorresiste antes das etapas de exposição e revelação e (b) lâmina com fotorresiste após as etapas de exposição e revelação. Cada retângulo possui dimensões de 30 μm x 90 μm e o espaçamento entre esses retângulos é de 60 μm (fotos com mesma ampliação).

Para resolver esse problema, foi feita uma rampa de temperatura a partir do ambiente até 105° C, onde a temperatura era variada de 10 em 10° C e o tempo de estabilização após cada mudança de temperatura era de 2 minutos, como mostra a figura 3.3.

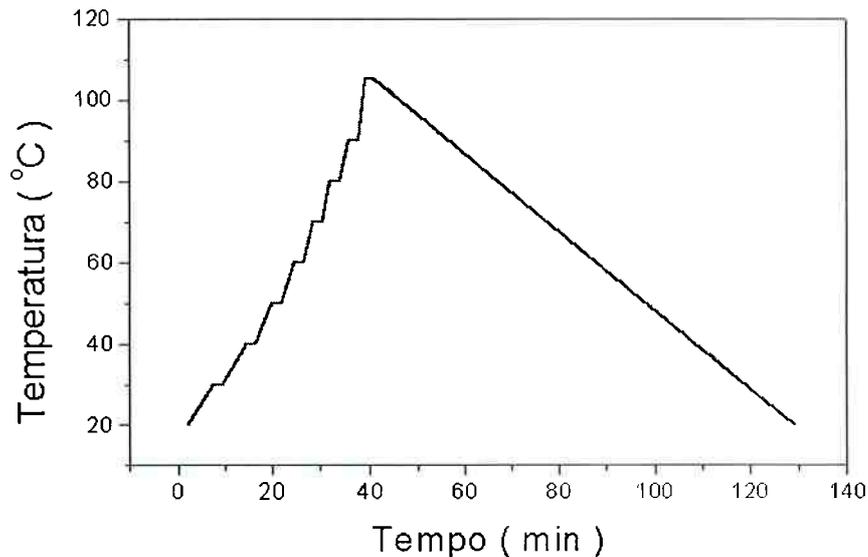


FIGURA 3.3 Curva da rampa de temperatura de cura (tempo de subida e descida), após a etapa de deposição do fotorresiste AR-P 322.

Com a rampa de temperatura, ocorreu a eliminação suave do solvente contido na cadeia polimérica do resiste, sem gerar problemas relacionados a *stress* no filme de AR-P 322.

Foi feito o levantamento do espectro FTIR das amostras com resiste depositado sem a rampa de temperatura e com a rampa de temperatura, a fim de verificarmos se ocorria alguma mudança nas características do resiste empregado neste trabalho. Os espectros obtidos, são apresentados na figura 3.4.

Analisando os espectros FTIR das amostras depositadas com e sem rampa de temperatura, notamos que não ocorreu a degradação do resiste após realizarmos uma rampa de temperatura de cura no AR-P 322. Portanto, empregando-se o procedimento de rampa para eliminar a maior parte de solvente contido no filme de resiste depositado, diminuindo os problemas gerados pelo *stress* do filme de AR-P 322, o filme não perdeu suas propriedades sensíveis a exposição. A rampa de aquecimento para o tratamento térmico do resiste foi utilizada nas demais etapas que fazem parte deste trabalho. Logo, não houve nenhuma influência negativa no uso de rampas de aquecimento para a eliminação de uma maior parte de solvente contido na cadeia polimérica do resiste.

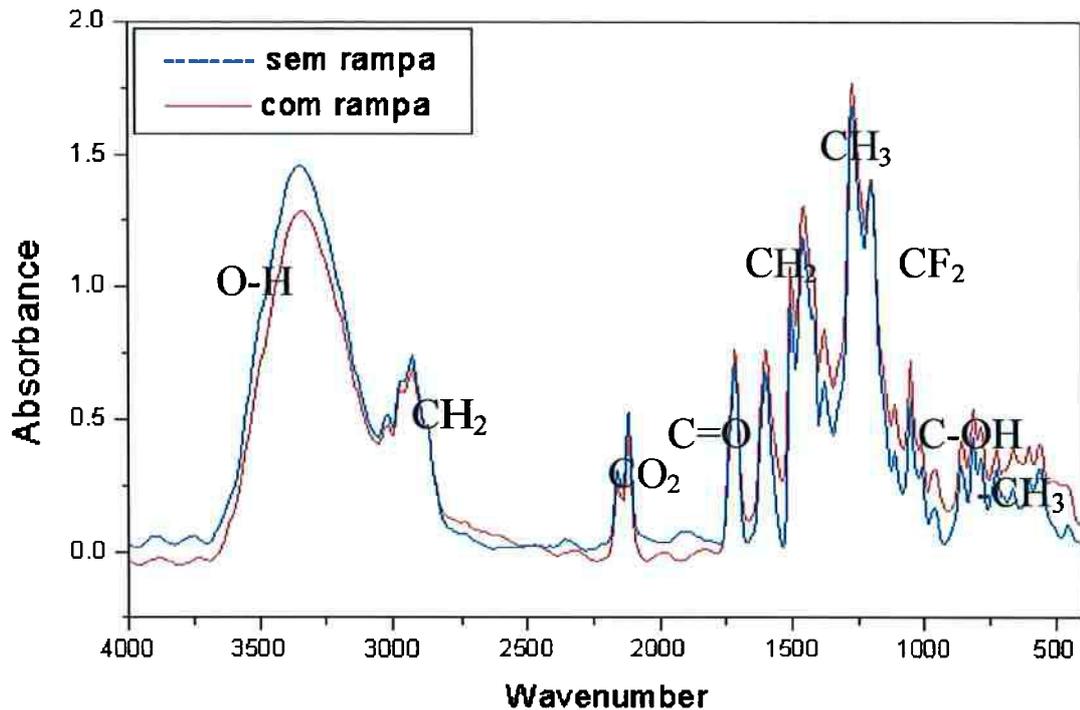


FIGURA 3.4 Espectro FTIR das amostras com AR-P 322 de 20 μm de espessura depositadas a 1000 rpm, durante 40 s, com e sem rampa de temperatura.

3.2.2 Estudo da Exposição por Feixe de Elétrons

A seguir foi realizado um teste para avaliar a sensibilidade do AR-P 322 à exposição por feixe de elétrons levantando-se a curva de contraste para o resiste (medindo-se a quantidade de filme revelado pela dose de exposição do feixe de elétrons).

A curva de contraste foi gerada usando-se um conjunto de retângulos de 30 μm de largura por 90 μm de altura, com uma distância entre eles de 60 μm . A seqüência de exposição/revelação utilizada foi:

- A exposição é feita, utilizando-se um padrão de retângulos (num total de 66, distribuídos em 11 colunas e 6 linhas), variando-se a dose da exposição para cada retângulo. O tempo total de exposição é de 3,5 minutos.
- Após a exposição, a lâmina fica em repouso durante 30 minutos.
- Revelação : tempo de 2 minutos em uma solução de revelação de 1,5 de água para 1 de revelador (AR-300-26).
- Interrupção em água.
- Enxágüe em H_2O .

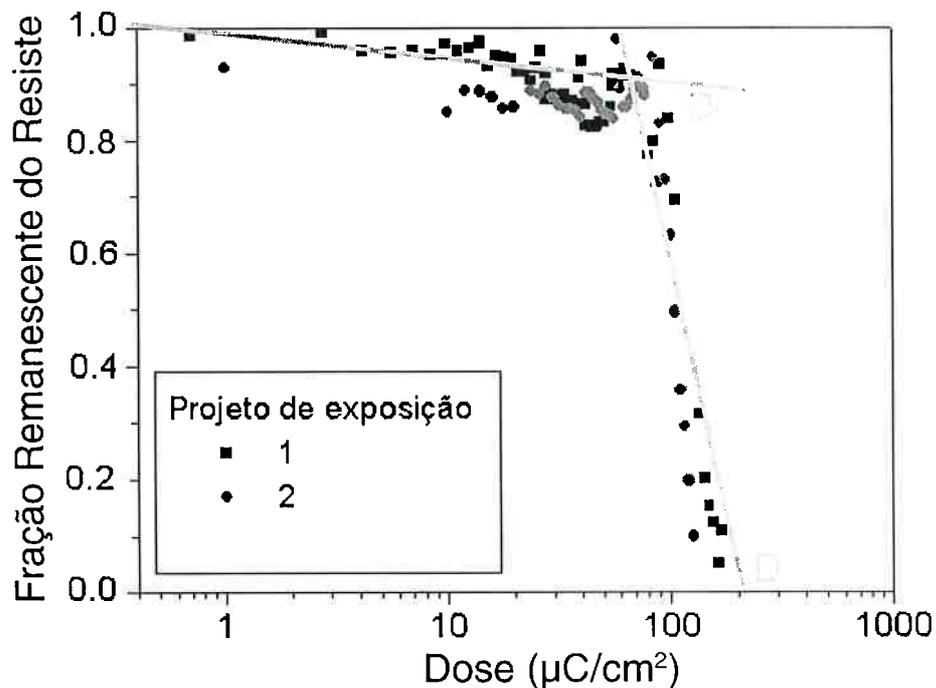
f) Secagem com N_2 .

Para a exposição ao feixe de elétrons, foi utilizado um arquivo de exposição (cont7.gdb), com as seguintes características :

- a) SEM *step size*: $8 \rightarrow 160$ nm
- b) corrente: 0,456 nA
- c) sensibilidade: $70 \mu\text{C}/\text{cm}^2$
- d) *dwell time*: 392,98 μseg
- e) \varnothing do feixe: $261 \text{ nm} \pm 50\%$ de *overlap*.

Após a exposição e a revelação do fotorresiste, foi feita a medida da profundidade dos retângulos, utilizando-se o perfilômetro (DEKTAK 3030) e com isso foi possível levantar a curva de contraste para o resiste AR-P 322 exposto ao feixe de elétrons.

Foram usados dois projetos de exposição. No primeiro, a energia do feixe de elétrons usada varia de 0,7 a $168 \mu\text{C}/\text{cm}^2$; no segundo projeto de exposição, a energia do feixe de elétrons varia de 1 a $240 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. A curva de contraste para o resiste empregado neste trabalho é apresentada na figura 3.5.



Analisando o gráfico e traçando uma reta tangente à região de transição entre a região de alta exposição e a região de baixa exposição, podemos obter o valor da energia mínima do feixe de elétrons necessária para sensibilizar e remover todo o fotorresiste AR-P 322 exposto, que é de $150 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Portanto, o valor de D_{100} no caso deste processo e do resiste AR-P 322 é de $150 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

Observando-se a curva de contraste, podemos também definir a menor energia necessária para que ocorra a reação fotoquímica do resiste exposto ao feixe de elétrons. Essa energia é conhecida como D_0 e no caso do AR-P 322 é de $70 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, para o processo empregado neste trabalho.

Com os valores de D_0 e D_{100} , podemos definir o valor do contraste do resiste, definido pela função:

$$\gamma = 1 / (\log_{10} (D_{100} / D_0)) = 1 / (\log_{10} (150 / 70)) = 3,02$$

Pela literatura, os fotorresistes ópticos apresentam contrastes com valores entre 2 e 3. Pelos experimentos realizados, obtivemos um contraste em torno de 3, para um resiste óptico usado com exposição por feixe de elétrons. Esse valor de contraste mostra que o resiste empregado neste trabalho pode ser empregado em litografia por feixe de elétrons, mantendo um bom valor de contraste para seu uso neste tipo de processo litográfico. Deve-se observar, no entanto, que em se tratando de camadas espessas, nem todo o resiste é sensibilizado e portanto necessita-se aplicar alguma técnica de imagem na superfície.

3.2.3 Estudo da Sililação do Resiste ARP-322

Nesta etapa do trabalho foram utilizadas amostras depositadas em *spinner* com rotação de 1000 rpm durante 40 segundos e não expostas pois o silício incorpora-se nestas.

Para a sililação, foram usadas duas lâminas: uma com rampa de temperatura de cura até 105°C e outra sem rampa de temperatura (somente com uma cura de 2 minutos a 105°C).

A sililação foi feita por via úmida, utilizando-se uma solução de 100 ml com as seguintes concentrações dos componentes para esta etapa:

- a) Xileno → 70 %
- b) PGMEA → 25 %
- c) HMCTS → 5 % [48].

Cada lâmina foi dividida em nove pedaços e esses pedaços foram submetidos a diferentes condições de sililação: foram usadas três temperaturas para a solução de sililação (40° C, 60° C e 80° C) e também para cada temperatura foram utilizados três tempos (1, 2 e 4 minutos) de imersão da amostra na solução.

No geral, foram feitas 18 amostras (com e sem rampa de temperatura), utilizando-se uma banho térmico para o controle da temperatura da solução de sililação. Em seguida, foi feito o levantamento dos espectros de FTIR para essas amostras a fim de quantificar a incorporação de silício no resiste AR-P 322.

Os testes para determinar se o silício se incorporava nas cadeias poliméricas do resiste AR-P 322 e de quanto era essa incorporação foram realizados a seguir. Para isso, foram feitas medidas de FTIR e RBS, que serão apresentadas nesta seção. O experimento de sililação foi feito para as condições listadas na tabela 3.1 e apresentadas na figura 3.6.:

Tabela 3.1 Condições empregadas nos experimentos de sililação (líquida).

Temperatura do banho de sililação	Resiste espalhado Com Rampa de Cura	Resiste espalhado Sem Rampa de Cura
40° C	1, 2 e 4 minutos	1, 2 e 4 minutos
60° C	1, 2 e 4 minutos	1, 2 e 4 minutos
80° C	1, 2 e 4 minutos	1, 2 e 4 minutos

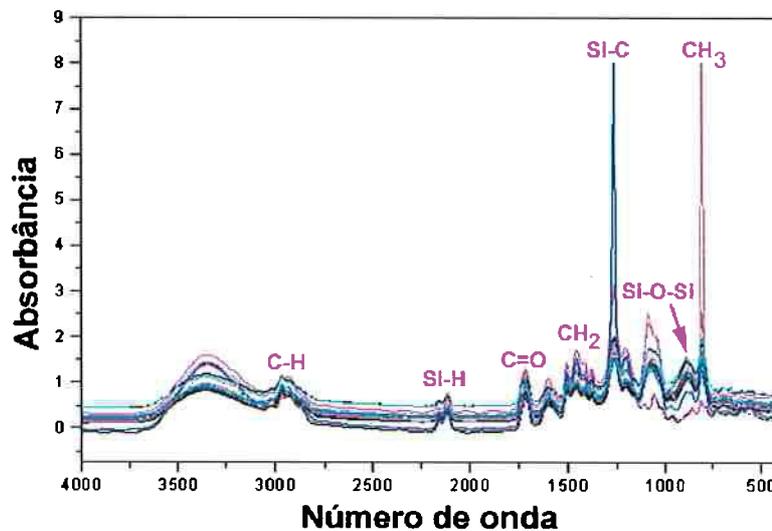


FIGURA 3.6 Espectro FTIR das amostras sililadas com e sem rampa de temperatura, antes da etapa de breve revelação com plasma de oxigênio.

Analisando os espectros da figura 3.6 e tomando como referência os picos relacionados à raia 1230-1300 cm^{-1} , que correspondem à ligação Si-C, e à raia 850-890 cm^{-1} , que corresponde à ligação Si-O-Si, podemos identificar as condições onde ocorreu maior incorporação de silício no resiste AR-P 322.

Foi observado que para condições de sililação sem a etapa de rampa de temperatura, a intensidade do pico referente a ligação Si-C foi muito baixa, o que significa que a incorporação do silício foi bem menor. Isso indica que provavelmente o solvente presente no resiste inibe a difusão de silício no interior do mesmo. Para condições de sililação onde as amostras foram submetidas a rampas de temperatura e a temperatura do banho de sililação foi de 60° C ou 80° C, a quantidade de ligações Si-C também não foi muito intensa. Pelas análises feitas, a melhor condição para a sililação do resiste AR-P 322 foi para a amostra submetida a rampa de temperatura após a deposição do resiste, com temperatura da solução de 40° C e tempo do banho de 2 minutos. A figura 3.7 apresenta somente os espectros FTIR para a condição de sililação onde ocorre a presença de um maior número de ligações Si-C e para uma condição onde ocorrem poucas ligações Si - C.

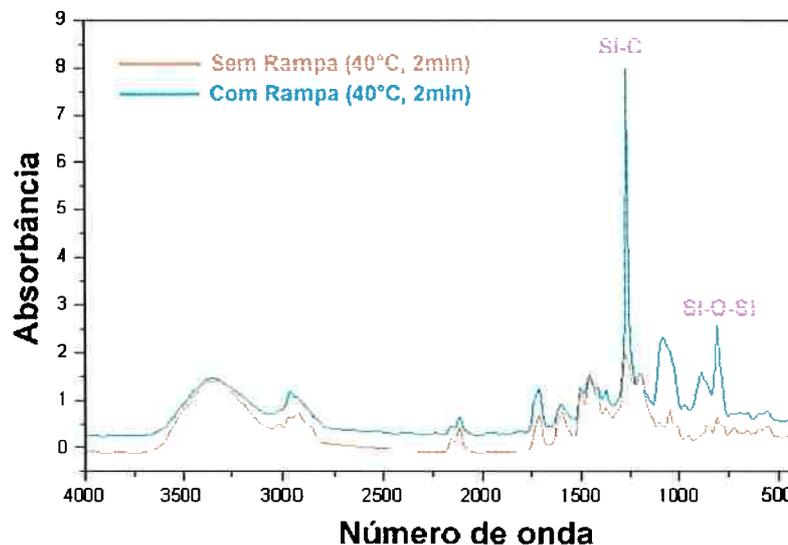


FIGURA 3.7 Espectros FTIR para condições de maior e menor intensidade das ligações Si-C e Si-O-Si, que medem a quantidade de Si incorporado no resiste AR-P 322.

Para quantificarmos a presença da ligação Si-C presente nas amostras após a etapa de sililação, fizemos a relação da área do pico referente a essa ligação, para todas as amostras em função do tempo de imersão da amostra na solução de sililação. O resultado obtido é mostrado na Figura 3.8, que mostra que o número de ligações Si-C para uma temperatura de 40° C, em particular, é pelo menos 3 vezes maior que para as outras condições.

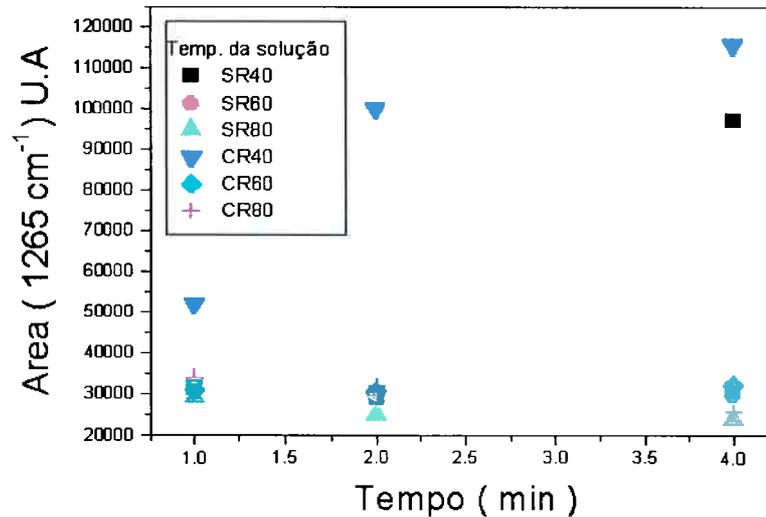


FIGURA 3.8 Gráfico da análise referente as áreas dos picos da ligação Si-C obtida nos espectros FTIR. (SR- sem rampa de temperatura e CR- com rampa de temperatura).

Para melhor visualização da quantidade total de silício incorporada no resiste, temos na figura 3.9 os espectros RBS das amostras e uma ampliação da região que corresponde ao canal referente à incorporação de silício.

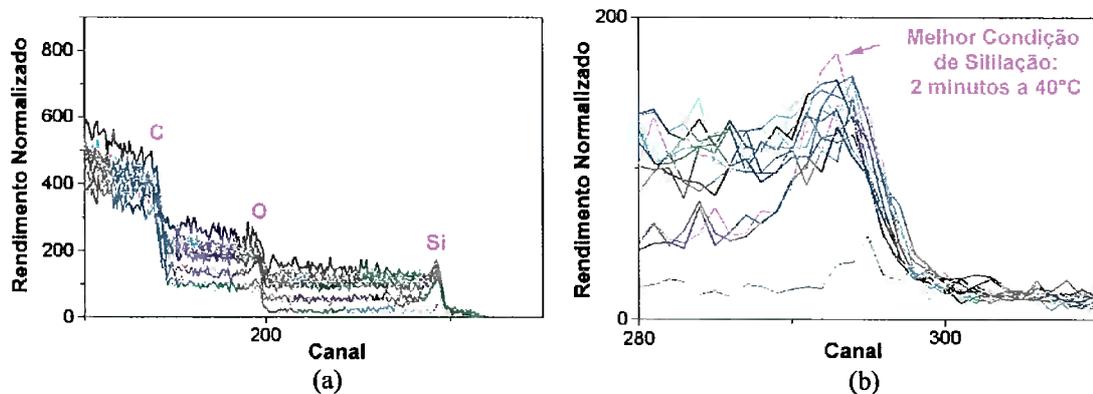


FIGURA 3.9 (a) Espectros RBS das amostras sililadas, após breve revelação com plasma de oxigênio; (b) Visualização do canal onde é quantizada a incorporação do silício (melhor condição: com rampa de temperatura, tempo de imersão de 2 min e 40° C de temperatura da solução de sililação).

A melhor condição de sililação é obtida para a maior incorporação de silício na superfície do resiste depositado sobre a lâmina de silício, o que foi obtido, segundo o RBS, para a condição de 40° C, dois minutos, na amostra com rampa de cura. Isso confirma a análise feita por FTIR e mostrou que a quantidade de ligações Si-C está correlacionada à quantidade total de incorporação de átomos de Si.

Assim, os espectros de FTIR e RBS mostram que a melhor condição para a sililação deste resiste é obtida para amostras submetidas a rampa de temperatura, após a etapa de deposição por spinner, com uma solução de sililação aquecida a 40° C e com um tempo de imersão da amostra na solução de 2 minutos.

3.3 Resultados Experimentais

3.3.1 Desenvolvimento do Processo Tripla Camada com Resiste Espesso

3.3.1.1 Caracterização Inicial

Para iniciar o estudo do comportamento da etapa de revelação seca, para resistes espessos, empregamos um processo multicamadas. Nesse processo é interessante que se tenha uma camada inferior de resiste mais espessa. Porém, camadas muito espessas de resistes tendem a ter maiores problemas com *stress*, como o surgimento de trincas e rachaduras.

Assim, foi feito o levantamento da curva do *stress* da camada espessa de resiste (AR-P 322), em função da espessura da mesma. Para isso foram feitas deposições de AR-P 322, variando-se a rotação do *spinner* de 1000 a 6000 rpm. Após as deposições, foram feitas rampas de cura com temperaturas finais de 105° C.

Após a deposição do fotorresiste sobre a lâmina, foi gerado um degrau (filme foi removido localmente), para que fosse possível medir a espessura deste degrau em um perfilômetro. A geração do degrau e a remoção do resiste e a medida da espessura são feitas como descrito anteriormente. Os valores das medidas de espessuras são necessários pois são parâmetros para se determinar o *stress* do filme depositado.

Todas as amostras foram depositadas com rampa de cura de temperatura (variando de 10°C em 10° C, com tempo de estabilização da temperatura de 2 minutos) e foram utilizadas seis lâminas com diferentes temperaturas finais de cura (uma sem rampa, 50° C, 100° C, 150° C, 200° C e 250° C). A curva do *stress* em função da espessura do filme de AR-P 322 depositado, é apresentada na figura 3.10.

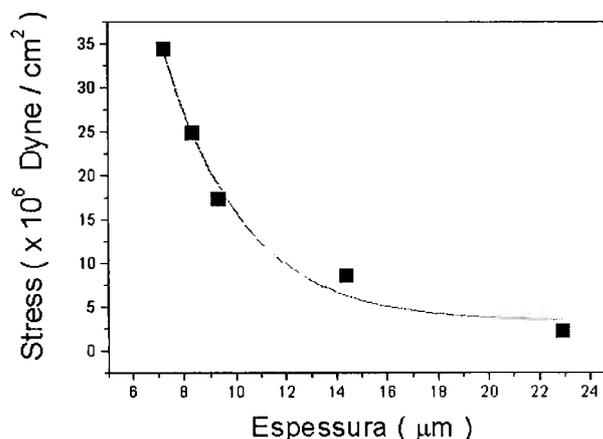


FIGURA 3.10 Gráfico do Stress em função da espessura da camada de resiste depositado. Com rampa e temperatura final de cura de 105° C.

Analisando-se o gráfico acima, percebemos que quanto mais espessa é a camada de resiste, menor é o *stress* após o processamento térmico. Desta forma, o resiste usado neste trabalho torna-se viável para aplicações em processos tripla camada, com camada espessa ($\sim 22\mu\text{m}$), sem apresentar muitos problemas relacionados com *stress*.

Apesar de apresentar menor *stress*, as camadas de resiste mais espessas contêm maior quantidade de solvente em suas cadeias poliméricas. Para o processo tripla camada, temos que obter uma camada de resiste com a menor quantidade de solvente em sua cadeia polimérica para evitar bolhas. Portanto, foi feito o estudo do *stress* na camada de AR-P 322 em função da temperatura de cura para determinar qual a maior temperatura de cura antes que ocorresse trincas. Para isso foram utilizadas lâminas depositadas com uma rotação do *spinner* de 1000 rpm durante 40 segundos.

A curva do *stress* em função da temperatura de cura do resiste, é mostrada na figura 3.11 para o filme de $22\mu\text{m}$ de espessura.

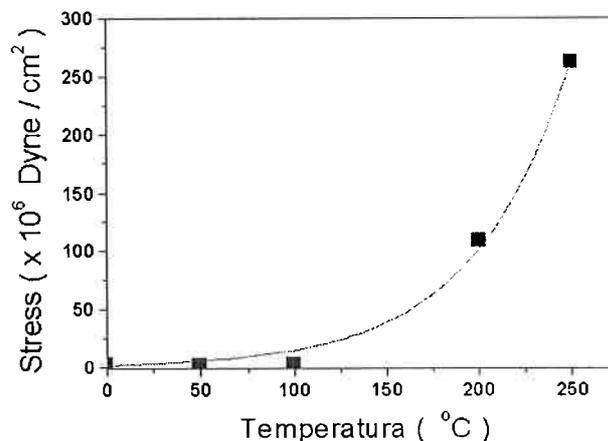


FIGURA 3.11 Gráfico do stress em função da temperatura de cura do resiste (com rampa de aquecimento) empregando cura com rampa.

Observamos que, quanto maior a temperatura de cura, maior é o *stress* na camada de resiste espesso ($22\mu\text{m}$), provavelmente devido ao maior gradiente de temperatura ao longo do filme, especialmente para os últimos degraus de temperatura da figura 3.3. Assim, temos um compromisso entre a espessura da camada inferior de resiste (espessa) e a temperatura final de cura que será utilizada nos processos finais.

Inicialmente o processo tripla camada utilizou lâminas com filme de AR-P 322 depositados num *spinner* com velocidade de rotação de 1000 rpm ($\sim 22\mu\text{m}$ de espessura) e com temperatura final de cura de 200°C (com rampa de temperatura). O *stress* gerado na camada de resiste espesso foi alto, o que provocou trincas nas três

camadas do processo tripla camada (resiste espesso, alumínio e resiste para definição das demais camadas), figura 3.12.

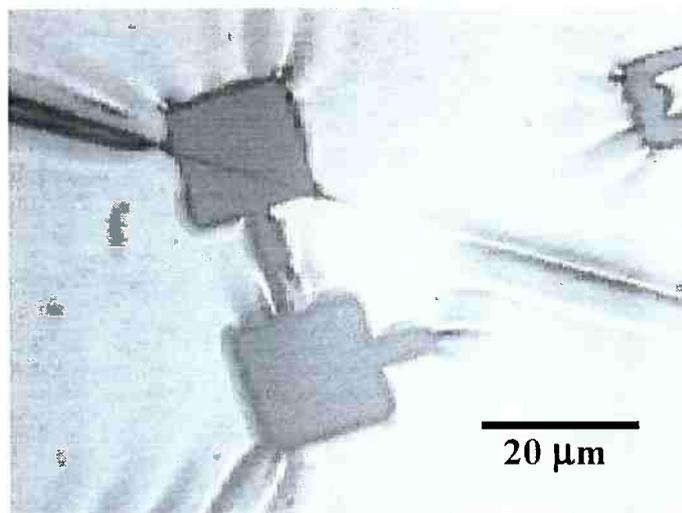


FIGURA 3.12 Foto obtida em um Microscópio Óptico. Estrutura obtida em um processo *tripla camada*. Lâmina depositada com rotação do spinner de 1000 rpm e temperatura final de cura de 200° C, com rampa de temperatura (Notamos pela foto, a formação de trincas na camada de alumínio, devido ao stress gerado na camada de resiste espesso).

Um outro teste foi feito usando-se lâminas com filme de AR-P 322 depositados num *spinner* com velocidade de rotação de 1000 rpm e com temperatura final de cura de 105° C. A quantidade de solvente no resiste foi tão grande que formaram-se bolhas devido a volatilização do solvente na camada de resiste, que gerou o deslocamento da camada de alumínio e da camada de resiste usado como máscara. Esses problemas são melhores visualizados na figura 3.13.



FIGURA 3.13 Foto obtida em um Microscópio Eletrônico de Varredura. Formação de bolhas e o "levantamento" da camada de alumínio devido a formação de bolhas (eliminação do solvente contido na camada de resiste espesso). Lâmina depositada com rotação do spinner de 1000 rpm e 105° C de temperatura final de cura.

Devido a esses problemas com o processo tripla camada inicialmente desenvolvido, repetiu-se o procedimento para uma camada de resiste espessa depositada com velocidade de rotação do *spinner* de 2000 rpm ($\sim 20 \mu\text{m}$ de espessura) e temperatura final de cura de 200°C (consideramos que o valor de $100 \times 10^6 \text{ Dina/cm}^2$ para o *stress* é um valor adequado pois o filme não apresentou rachaduras) e potencialmente o filme não apresenta bolhas nem descolamentos.

Os resultados obtidos com esse processo, satisfizeram às necessidades de termos uma camada de resiste usada como camada de planarização, de aproximadamente $20 \mu\text{m}$ de espessura isenta de trincas e bolhas, que pode ser empregada em processos com altas razões de aspecto. Com a temperatura final de cura de 200°C e uma menor espessura utilizada da camada de resiste espessa de AR-P 322, uma maior quantidade de solvente pode ser retirada da cadeia polimérica do resiste, sem que houvesse problemas devido a *stress* do filme.

Para as demais etapas de processos que serão aplicadas na etapa da técnica de imagem na superfície utilizando um processo tripla camada, será utilizada uma velocidade de rotação do *spinner* de 2000 rpm (aproximadamente $20 \mu\text{m}$ de espessura do filme de AR-P 322) e uma temperatura final de cura de 200°C .

3.3.1.2 Estudo da Etapa de Corrosão do Processo Tripla Camada

Após determinarmos as melhores condições para produzir a estrutura do processo de três camadas, foi feito o estudo sobre a etapa de revelação por plasma da camada de resiste espesso de AR-P 322 a ser utilizado após as etapas de revelação da camada superficial de resiste e após a corrosão da camada intermediária de alumínio (ambas corroídas via úmida). As amostras foram depositadas em *spinner* com 3000 rpm durante 40 segundos e foi feita uma rampa de temperatura até 200°C .

A seguir, é descrito todo o processamento para fabricação do processo tripla camada.

- a) Deposição do promotor de aderência (HMDS) (2000 rpm, 10s).
- b) Deposição de AR-P 322 (3000 rpm, 40s, $20\mu\text{m}$).
- c) Cura com rampa de temperatura até 200°C .
- d) Evaporação térmica de alumínio (espessura de 200 nm).
- e) Deposição do promotor de aderência HMDS (2000 rpm, 10s).

- f) Deposição de resiste óptico OFPR 800 (novolac) TOKYO OHKA (4000 rpm, 20s, 4 μm).
- g) Cura com rampa de temperatura até 90° C.
- h) Exposição óptica do resiste OFPR 800 (novolac) TOKYO OHKA.
- i) Revelação úmida do resiste OFPR 800 (novolac) TOKYO OHKA.
- j) Cura com rampa de temperatura até 90° C.
- k) Corrosão úmida do alumínio.
- l) Revelação por plasma de oxigênio da camada de resiste espesso.

Na etapa de evaporação térmica do alumínio, foi utilizada uma pressão de $8 \cdot 10^{-6}$ Torr e uma corrente do filamento de 30 A. Desta forma, obtemos uma camada de 200 nm de espessura de alumínio.

Na etapa de revelação do resiste óptico OFPR 800 (novolac) da TOKYO OHKA, foi usada uma solução de revelação com 2 : Revelador + 1 : água. O revelador usado foi o HPRD 402 do OLIN HUNT (positivo) e o tempo da revelação foi de 40 segundos.

Para a corrosão úmida do alumínio foi usada a seguinte solução química:

- a) 150 ml de água.
- b) 30 ml de ácido nítrico
- c) 350 ml de ácido fosfórico.

A revelação por plasma da camada espessa de resiste, foi testada inicialmente com o equipamento de corrosão por plasma na configuração tipo RIE (*Reactive Ion Etching*). As amostras foram inicialmente expostas a um plasma de oxigênio durante 30 minutos, para a obtenção da taxa de corrosão do polímero em função dos parâmetros de processo (pressão final na câmara e potência no eletrodo).

Após a etapa de corrosão por plasma de oxigênio, foi medido a altura do degrau da estrutura formada com um perfilômetro. Desta forma foi possível levantar o gráfico da espessura de resiste removida em função da potência e da pressão final, que determina o valor da taxa de corrosão deste resiste (figura 3.14a).

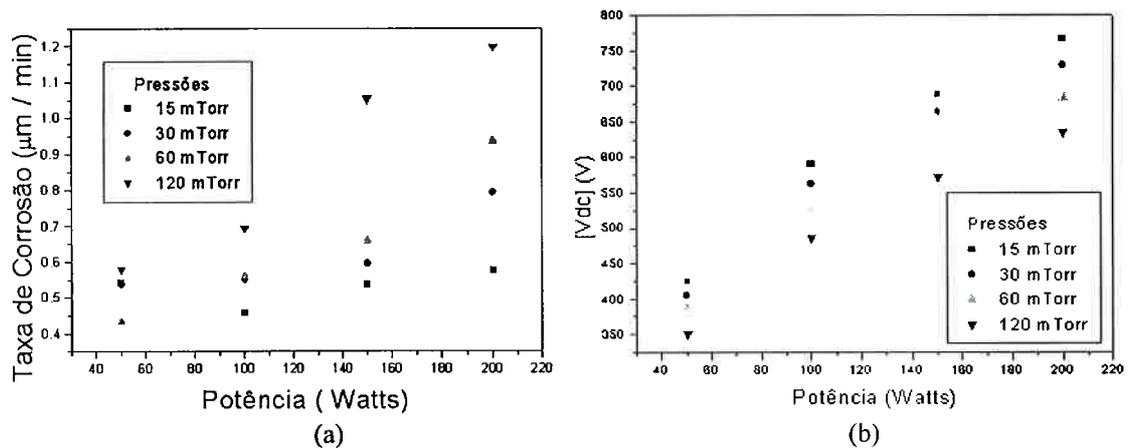


FIGURA 3.14 (a) Gráfico da Taxa de corrosão do resiste AR-P 322 em função da variação de potência no eletrodo e da pressão final na câmara de processo; (b) Gráfico do potencial de auto polarização (Vdc) em função da variação da potência aplicada ao eletrodo e da pressão na câmara de processo.

Analisando-se a figura 3.14a, observa-se que quanto maior a potência e a pressão na câmara de processo, maior é a taxa de corrosão do resiste com plasma de oxigênio. Isso ocorre pois para valores de pressões e potência maiores, a quantidade de gás ionizado para promover a corrosão do resiste é maior. Porém, para altas pressões, ocorre a corrosão parcialmente isotrópica da camada de resiste espesso (a quantidade de gás não ionizado na forma reativa é grande o suficiente para que ocorra a corrosão por baixo da máscara de alumínio e o grau de bombardeamento é baixo). Para pressões mais baixas e menores potências no eletrodo, apesar de termos menor quantidade de gás ionizado que implica em uma menor taxa de corrosão, a corrosão da camada de resiste espesso ocorre de forma mais anisotrópica devido ao bombardeamento iônico, ocorrendo assim, menor corrosão por baixo da máscara de alumínio no processo tripla canal. Pode-se observar também nessa figura que o aumento da pressão neste processo é o fator que mais influencia a taxa de corrosão, o que indica que essa taxa de corrosão está limitada pela quantidade de espécies ativas presentes.

Com o processo RIE, para uma pressão de 30 mTorr e potência de 50 W, é possível obter estruturas como as apresentadas na figura 3.15, onde as linhas têm 2 μm largura por 20 μm de altura.

Após o estudo feito sobre revelação por plasma do resiste espesso utilizando o equipamento na configuração tipo RIE, foi feito também um estudo similar sobre a corrosão do silício utilizando-se o equipamento de corrosão por plasma na configuração tipo ICP (*Inductively Coupled Plasma*), variando-se inicialmente a pressão final na câmara de processo e a potência aplicada ao eletrodo, acrescentando-se agora a variação da potência aplicada à bobina.

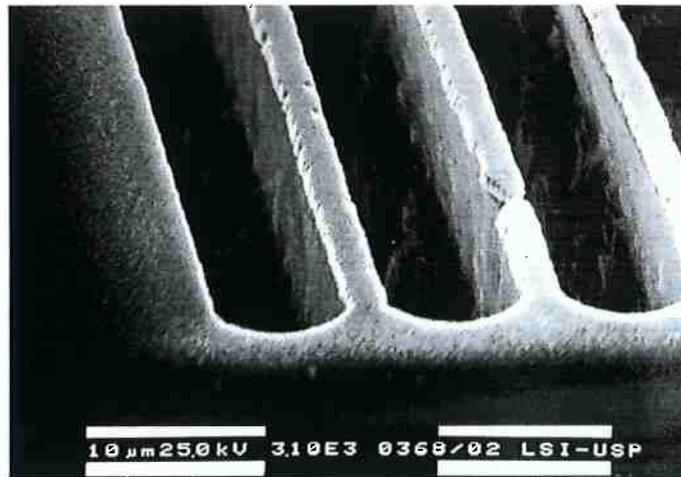


FIGURA 3.15 Foto obtida em um Microscópio Eletrônico de Varredura. Estrutura final obtida em um processo *tripla camada*, usando um plasma de oxigênio, com pressão final da câmara de 30 mTorr e potência de 50 W. Visualização da máscara de alumínio sobre o resiste espesso. Definição de linhas de ~2 μm, com perfis anisotrópicos (relação de aspecto 10 : 1).

Novamente, as amostras foram expostas a um plasma de oxigênio durante 30 minutos, para a obtenção da taxa de corrosão do polímero em função dos parâmetros de processo (pressão final na câmara, potência no eletrodo e potência na bobina).

Analisando-se os gráficos da Figuras 3.16, notamos que as taxas de corrosão tanto para uma potência aplicada à bobina de 100 W, quanto para uma potência aplicada à bobina de 150 W, são bem menores que as taxas obtidas no equipamento de corrosão tipo RIE (máximo de 0,2 μm/minuto). Podemos perceber também que a variação da taxa de corrosão em função da potência aplicada à bobina (de 100 e 150 W) não é significativa. Isso pode ser devido ao limite de ionização da bobina interna utilizada para a configuração ICP e ao gás utilizado no processo de corrosão por plasma. Sendo assim, mesmo alterando-se os valores de potência aplicada à bobina, a taxa de corrosão do resiste AR-P 322 no equipamento tipo ICP, permanece constante.

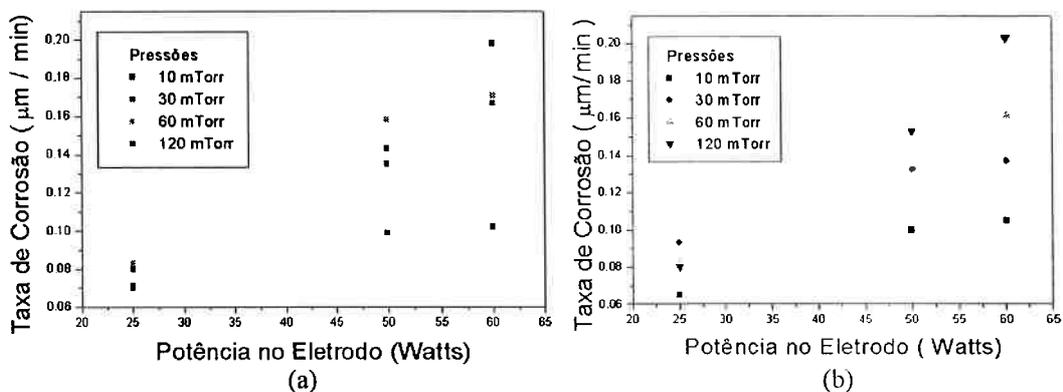


FIGURA 3.16 Gráficos da Taxa de corrosão do resiste AR-P 322 em função da variação da potência aplicada ao eletrodo e da pressão final na câmara de processo, utilizando um equipamento de corrosão tipo ICP: (a) com potência aplicada na bobina de 100 W; (b) com potência aplicada à bobina de 150 W.

Comparando-se os gráficos de taxa de corrosão (figura 3.16) e potencial de alto polarização para o modo ICP (figura 3.7), observa-se que ocorre um aumento em Vdc quando se diminui a pressão (mantendo-se a potência de RF constante). Por outro lado, a taxa de corrosão diminui com a diminuição da pressão (e portanto com o aumento do Vdc). Esse comportamento é contrário ao observado no modo RIE e indica que o modo ICP não está aumentando suficientemente a densidade de íons reativos próximo ao eletrodo (lâmina). Isso torna o modo ICP, pelo menos nestas condições, menos eficiente que o modo RIE.

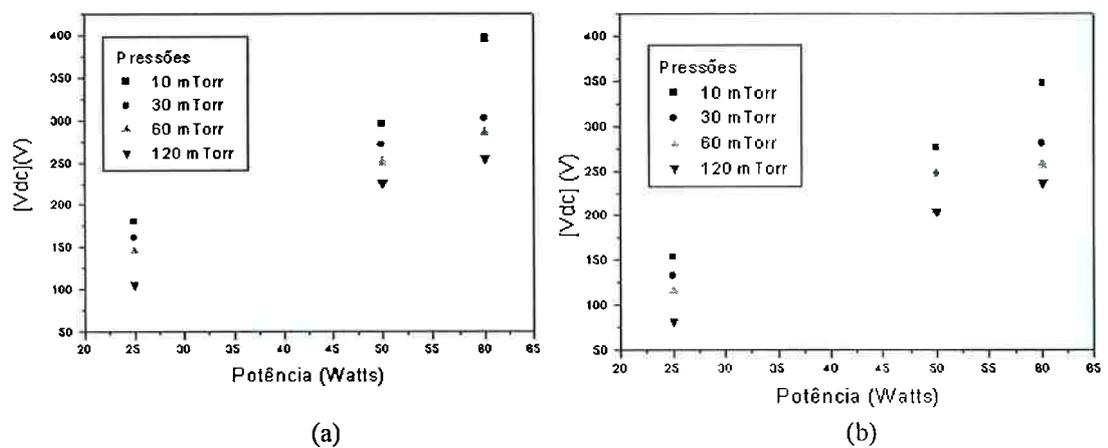


FIGURA 3.17 Gráfico do potencial de auto polarização (V_{dc}) em função da variação da potência aplicada ao eletrodo e da pressão na câmara de processo, com potência aplicada a bobina de: (a) 100 W; (b) 150 W.

Após o levantamento do gráfico da taxa de corrosão do resiste e do potencial de auto polarização usando-se o equipamento tipo ICP, foram analisados os perfis obtidos para as diferentes pressões finais na câmara de processo e para os diferentes valores de potência aplicadas ao eletrodo e à bobina, concluindo-se que a quantidade de resíduos nas estruturas era elevada. Por isso reduziu-se o valor da potência aplicada à bobina interna do equipamento de corrosão tipo ICP, e a quantidade de resíduos de resiste não corroído entre as estruturas diminuiu significativamente. Porém os perfis das estruturas obtidas sofre um ataque lateral, gerando um perfil negativo, devido ao ataque por íons que são defletidos (espalhados) ao colidirem com as paredes das estruturas e com o substrato, como é apresentado na figura 3.18.

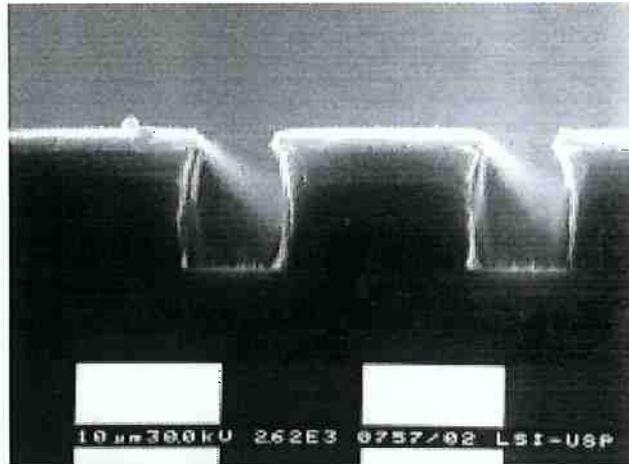


FIGURA 3.18 Foto obtida em um Microscópio Eletrônico de Varredura. Estrutura final obtida em um processo *tripla camada*, com pressão final de câmara de 60 mTorr, potência aplicada a bobina de 100 W e potência aplicada ao eletrodo de 60 W. Visualização da corrosão isotrópica das paredes das estruturas.

Reduzindo-se então a pressão no processo de corrosão ICP para 30 mTorr, mantendo-se a potência aplicada à bobina em 100 W, o efeito da corrosão lateral das paredes das estruturas da amostra é reduzido, tornando o processo mais anisotrópico, ou seja, o efeito do ataque iônico que gera o arredondamento dos perfis é significativamente reduzido. Os melhores resultados obtidos para a corrosão por plasma ICP do resiste AR-P 322 foram conseguidos utilizando-se uma pressão final na câmara de 30 mTorr, potência aplicada à bobina de 100 W e potência aplicada ao eletrodo de 60 W, como mostra a figura 3.19.



FIGURA 3.19 Foto obtida em um Microscópio Eletrônico de Varredura. Estrutura final obtida em um processo *tripla camada*, com pressão final de câmara de 30 mTorr, potência aplicada a bobina de 100 W e potência aplicada ao eletrodo de 60 W. Visualização da maior anisotropia das paredes das estruturas.

Comparando-se os equipamento de corrosão por plasma nas configurações tipo RIE e ICP, conseguimos obter perfis com uma anisotropia aceitável. Nos dois equipamentos foi possível revelar camadas espessas de resiste definindo os padrões das estruturas contidas na amostra. Isso nos mostra a viabilidade dos dois equipamentos em processos litográficos de multicamadas.

No entanto, no processo usando o equipamento tipo RIE obtivemos taxas de corrosão cinco vezes maiores ($0,55 \mu\text{m}/\text{min}$) que com o processo ICP para as condições de maior anisotropia dos perfis finais obtidos com o processo tripla camada. Portanto, o equipamento RIE mostrou-se mais eficiente do que o ICP para corroer estruturas no resiste AR-P 322. Além disso, no equipamento ICP a quantidade de resíduos de resiste após o tempo final de corrosão foi grande. No caso do equipamento tipo RIE, esse problema não foi tão evidente.

Assim, embora o ICP deva ser um equipamento mais eficiente que o RIE, é necessário se realizar um estudo mais amplo envolvendo modificações na geometria do reator e bobinas para se aumentar a taxa de corrosão e se reduzir a quantidade de resíduos. Desta forma, para este trabalho, o equipamento de corrosão tipo RIE foi considerado mais eficiente.

3.3.2 Desenvolvimento do Processo de Camada Simples com Sililação

Após termos estudado o processo de litografia de três camadas usando-se o resiste AR-P 322, foi feito um estudo para desenvolvermos um processo litográfico de camadas simples, de modo que fosse possível reduzir o número de etapas do processo litográfico e com isso o custo final e o tempo de processamento. Para isso foi estudada a etapa de sililação como técnica de imagem na superfície.

Como teste inicial do processo de camada simples, foi depositado AR-P 322 a 1000 rpm durante 40 segundos (espessura de aproximadamente $22 \mu\text{m}$) em duas lâminas. Depois da deposição, uma das amostras foi exposta ao feixe de elétrons e outra amostra foi exposta opticamente. Em seguida, ambas as amostras sofreram uma etapa de sililação (descrita previamente neste capítulo) e as respectivas revelações.

As amostras expostas por feixe de elétrons foram submetidas a um plasma de oxigênio para a revelação das estruturas, com 120 mTorr de pressão na câmara e 50 Watts de potência.

Foi feito um estudo da obtenção de estruturas com altas razões de aspecto utilizando-se a exposição por feixe de elétrons. Porém, os resultados obtidos com as amostras submetidas à revelação com plasma de oxigênio não geraram boas definições dos perfis das paredes das estruturas contidas nas amostras. Embora tenhamos conseguido desenvolver tal processo para resistes finos [kazuo], será necessário um estudo mais detalhado da etapa de sililação para integrá-la às técnicas de obtenção de estruturas em resistes espessos.

3.3.3 Utilização do Processo de Tripla Camada na Fabricação de Microengrenagens

O processamento para fabricação do processo tripla camada foi empregado em um processo para fabricação de microengrenagens utilizando-se litografia por feixe de elétrons. Para tanto, a seqüência de processamento foi modificada como a seguir:

- a) Deposição do promotor de aderência (HMDS) (2000 rpm, 10s).
- b) Deposição de AR-P 322 (3000 rpm, 40s, 20 μ m).
- c) Cura com rampa de temperatura até 200° C.
- d) Evaporação térmica de alumínio (espessura de 200 nm).
- e) Deposição do promotor de aderência HMDS (2000 rpm, 10s).
- f) Deposição de AR-P 322 (7000 rpm, 40s, 7 μ m).
- g) Cura com rampa de temperatura até 200° C.
- h) Exposição por feixe de elétrons do AR-P 322 (150 μ C/cm²)
- i) Revelação úmida do resiste AR-P 322 em uma solução 1,5(água DI):1(AR-P320-26)
- j) Cura com rampa de temperatura até 140(C.
- k) Corrosão úmida do alumínio.
- l) Revelação por plasma de oxigênio da camada de resiste espesso.

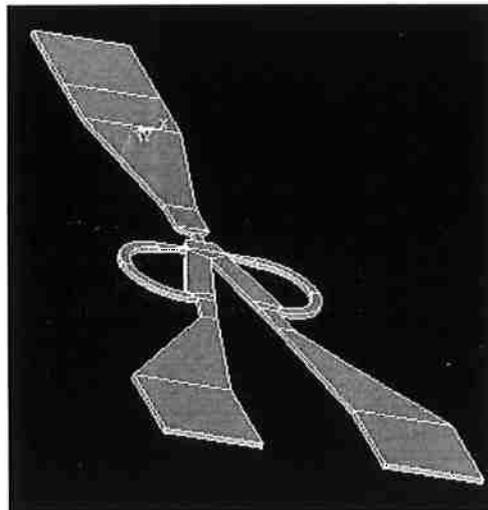
Seguindo-se essa seqüência, acrescida da etapa de corrosão por plasma, obteve-se o resultado apresentado na figura 3.20. Embora não mostrado nessa figura, antes da etapa de corrosão a estrutura no resiste não apresentava nenhum tipo de resíduo. No momento o trabalho de otimização desse processo encontra-se em andamento.



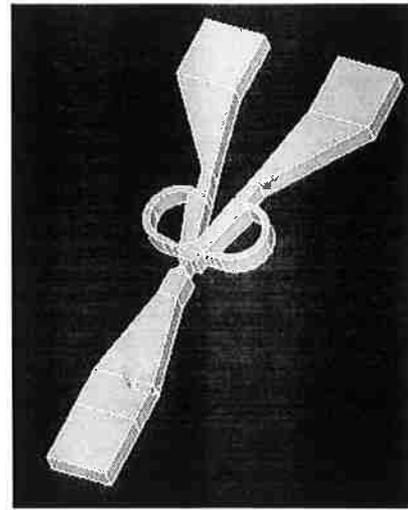
Figura 3.20 Foto obtida em um Microscópio Eletrônico de Varredura. Estrutura final obtida em um processo tripla camada empregando litografia por feixe de elétrons.

3.3.4 Utilização do Processo de Tripla Camada na Fabricação de Microsciladores Flúídicos

Um molde característico dos microsciladores a serem implementados em uma cooperação LSI/IPT [63-65] pode ser visto na figura 3.21, onde observamos a região ativa do dispositivo e os microcanais de interconexão para duas microestruturas, uma com 50 μm (processo por plasma) e a outra com 500 μm de espessura (possível com a tecnologia LIGA), que definem o microscilador flúídico padrão deste pós-doutoramento (área total de 12100 μm x 5100 μm). Note a grande diferença de razão de aspecto entre as duas microestruturas, estas característica afetam o regime de escoamento dos dispositivos.



(a) Molde com 50 μm de altura



(b) Molde com 500 μm de altura

FIGURA 3.21 Modelos tridimensionais dos moldes para os microsciladores flúídicos.

Para os testes de fabricação desses moldes empregando-se litografia por feixe de elétrons partiu-se de lâminas de silício (tipo p) de 3 polegadas que sofreram a seguinte limpeza química:

- a) 1 H_2O_2 + 4 H_2SO_4 (120 $^\circ\text{C}$, 10 min.)
- b) Remoção da solução com água deionizada corrente (5 min.)
- c) 5 H_2O + 1 H_2O_2 (30 %) + 1 NH_4OH (29 %) (80 $^\circ\text{C}$, 10 min.)
- d) Remoção da solução com água deionizada corrente (5 min.)
- e) 1 HF (49 %) + 20 H_2O (27 $^\circ\text{C}$, 30 s ou até secar)
- f) Remoção da solução com água deionizada corrente (30 s)
- g) 4 H_2O + 1 H_2O_2 (30 %) + 1 HCl (37%) (80 $^\circ\text{C}$, 10 min.)

- h) Remoção da solução com água deionizada corrente (10 min.)
- i) $1 \text{ H}_2\text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{SO}_4$ (120 °C, 10 min.)
- j) Remoção da solução com água deionizada corrente (5 min.)
- k) $4 \text{ H}_2\text{O} + 1 \text{ H}_2\text{O}_2$ (30 %) + 1 HCl (37%) (80 °C, 10 min.)
- l) Remoção da solução com água deionizada corrente (10 min.)
- m) Secagem com fluxo de nitrogênio

A seguir depositou-se como material de máscara um filme de alumínio de 200 nm evaporado (pressão de fundo = 5 μTorr , corrente do filamento de tungstênio = 20 A, em um equipamento Edwards 306A). A sequência de processamento litográfico empregando-se litografia por feixe de elétrons seguiu os passos a seguir:

- a) Aquecimento de desidratação e promotor de adesão
- b) Aquecimento de Desidratação = 150 °C - 600 s
- c) Cobertura com fotoresiste (SNR200 - $\pm 1,3 \mu\text{m}$, 4000 rpm, 60s)
- d) Aquecimento de evaporação de solvente: 105 °C - 60 s
- e) Exposição por feixe de elétrons da estrutura da figura 3.22.

Tensão de aceleração = 30 KeV

Dose = 30 a 220 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ (dose de 100 %)

Corrente = 6 nA

Magnificação = 40,8 x e 20,4 x

Campo de exposição = 800 x 800 μm e 1600 x 1600 μm

Spot do microscópio eletrônico de varredura = 5

Diâmetro do feixe = Passo de exposição = 96 nm

Dwell = 3,456 μm e 2,5 μm

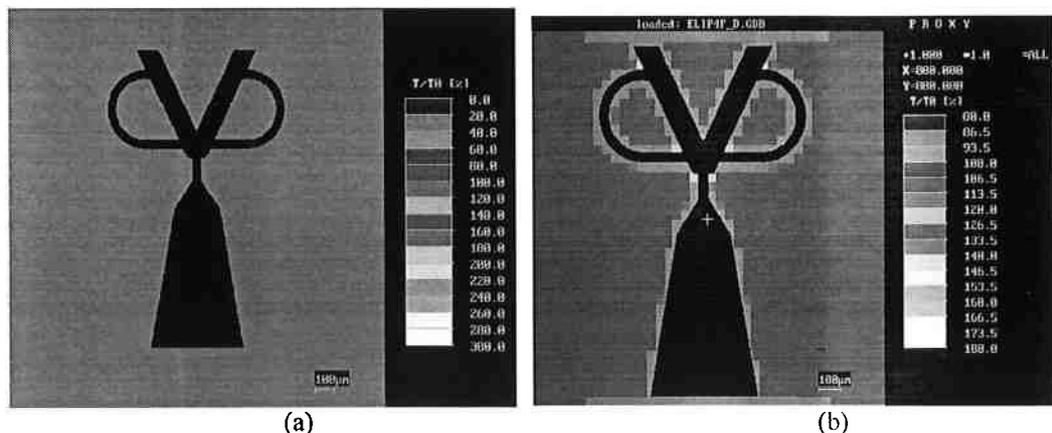


FIGURA 3.22 - (a) Descrição dos elementos de dose em função da intensidade padrão. (b) Região interna do microscilador fluido após ajuste de dose.

Por causa da complexidade desta estrutura, pois temos diversos ângulos, cantos arredondados e linhas não retas, foi necessário um ajuste de correção de efeito de proximidade no padrão de exposição. Na figura 3.22b temos um exemplo do resultado deste ajuste na definição dos microsciladores fluídicos. Observe que a dose está otimizada nos cantos e nos pontos de interseção primários da estrutura. Neste caso, o campo de $1600\ \mu\text{m} \times 1600\ \mu\text{m}$ demora cerca de 25 minutos para ser definido. Cabe salientar, que a definição da estrutura toda com os microcanais de interconexão resulta uma área de $12100\ \mu\text{m} \times 5100\ \mu\text{m}$, o que corresponde a uma exposição de 3 horas por amostra. Atualmente estamos avaliando a implementação de microsciladores fluídicos sem microcanais de interconexão.

f) Aquecimento pós-exposição = $100\ ^\circ\text{C}$ - 60 s

g) Revelação e "rinse"

Reveladores = tok NSD-TD ou tok NMD-W (diluído em água nas seguintes proporções = 1:3; 1:2,5 ou 1:1)

Imersão com agitação

Temperatura de revelação = $22\ ^\circ\text{C}$

Tempo de revelação = 180 s

Na figura 3.23 mostramos um exemplo de estruturas definidas em alumínio após a revelação. Observe também, a qualidade das bordas da máscara, sendo o contraste de cores observado devido a espessura do fotorresiste, no caso de $1,3\ \mu\text{m}$ (a) e $3\ \mu\text{m}$ (b) respectivamente.

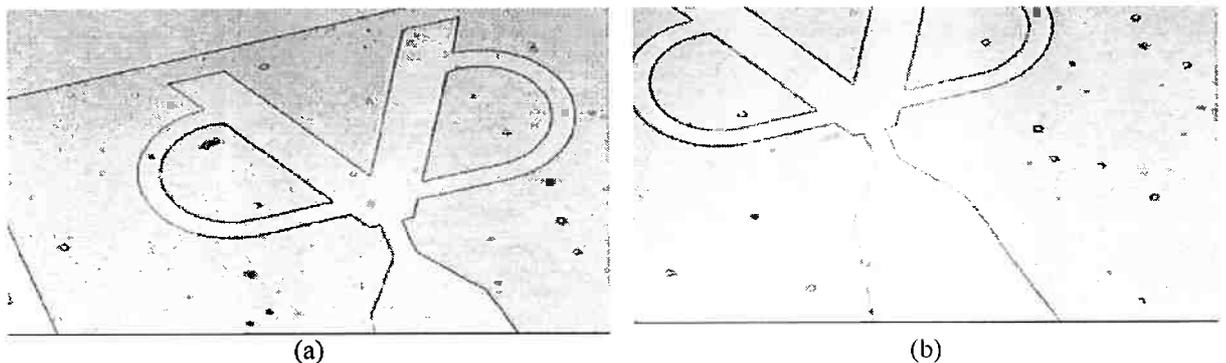


FIGURA 3.23 Exemplos das estruturas definidas em alumínio. Em (a) fotorresiste SNR200 de $1,3\ \mu\text{m}$ (deposição em 1500 rpm) e em (b) SNR200 de $3\ \mu\text{m}$ (deposição em 1300 rpm).

A figura 3.24 mostra um conjunto de estruturas definidas seguindo-se essa sequência de processamento em campos de $1,6\ \mu\text{m}$ e $3,2\ \mu\text{m}$.

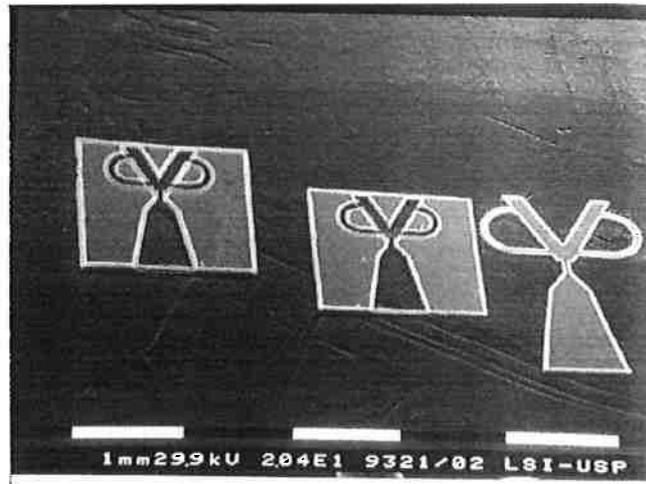


FIGURA 3.24 - Microscopia Eletrônica de Varredura mostrando um detalhe dos microdispositivos fluídicos indicados na Figura 6.2. Neste caso, temos um aumento de apenas 20 x.

A figura 3.26 apresenta os resultados obtidos após a etapa de corrosão do silício por plasma com SF₆ puro em processos convencionais de 1 hora.

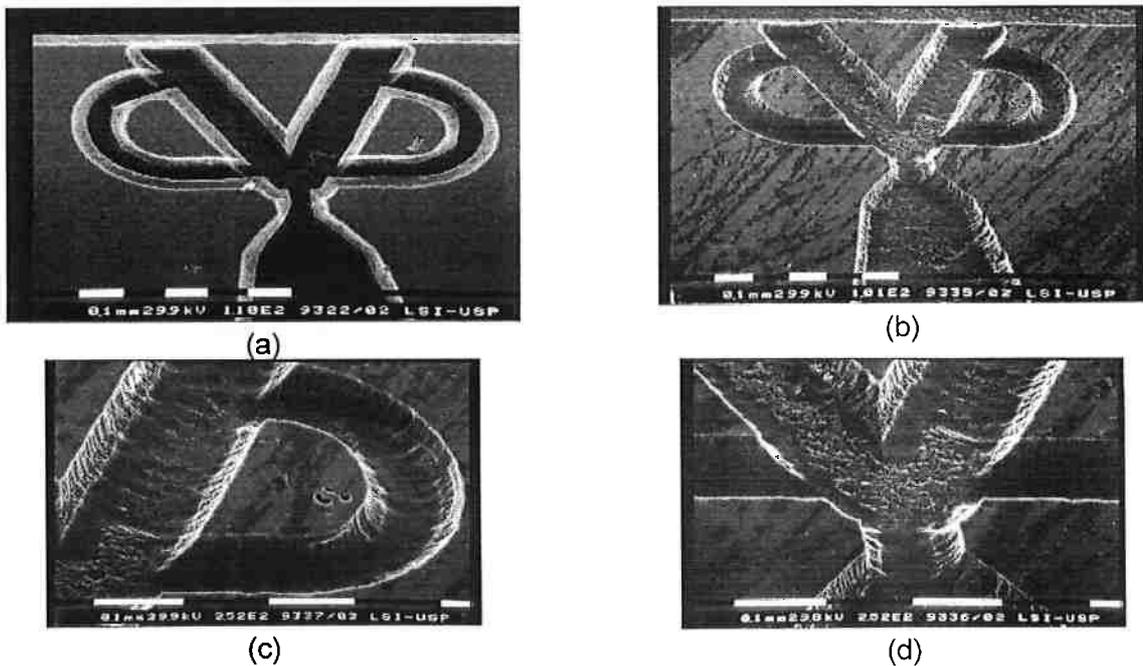


FIGURA 3.26 Padrão de corrosão por plasma obtido para SF₆ puro em processos convencionais. Neste caso, temos em: (a) região ativa antes da remoção do alumínio, (b) região ativa após remoção do alumínio, (c) detalhe do ciclo de realimentação e, finalmente, em (d) região de interação do microscilador fluídico. (Profundidade do microcanal de 67 µm).

Devido aos problemas durante a etapa de corrosão, o mesmo tipo de estruturas foi submetida a uma eletrodeposição de níquel para criar um molde a partir do resiste litografado. Utilizou-se uma solução de 0,1M de NiCl₂, 10 ml/l HF e 10ml/l NH₄F para a eletrodeposição. O processo foi realizado em temperatura ambiente e o pH

da solução é de 3,8. Este pH permitiu que a estrutura definida por feixe de elétrons com o resiste SNR 200, sem deformação das estruturas no resiste. A figura 3.27 mostra um molde estrutural de níquel fabricado com este processo. O filme metálico foi obtido após 5 horas, resultando em um filme de aproximadamente 22 μm .

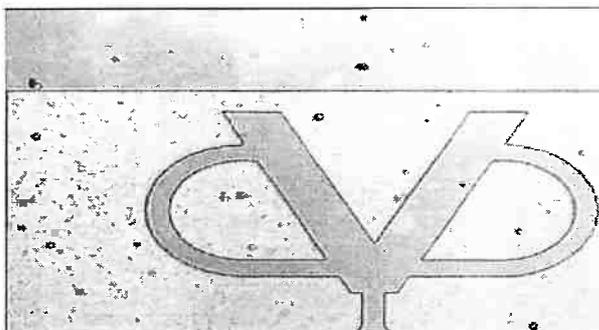


FIGURA 3.27 Filme de níquel eletrodepositado (espessura de 7,5 μm).

4. Litografia para Microdispositivos Ópticos

4.1 Introdução

Durante os últimos anos, as aplicações dos elementos ópticos difrativos (EOD) em sistemas e microssistemas ópticos apresentaram um rápido progresso[66]. EODs não só substituem ou complementam os elementos refrativos usuais, mas também abrem novos campos de aplicações onde as técnicas ópticas até então não tinham sido consideradas [67].

Uma das principais técnicas de escrita direta usada para a fabricação de microdispositivos ópticos é a litografia por feixe de elétrons. Por meio dela pode-se fabricar estruturas complexas sem a utilização de máscaras, diretamente a partir da base de dados em computador, em uma única etapa de exposição. A flexibilidade dessa técnica a torna adequada para a utilização no desenvolvimento de novos dispositivos. Particularmente no caso de microdispositivos ópticos essa técnica tem a vantagem de possibilitar a fabricação de moldes (matrizes) de dispositivos em relevo contínuo para produção em massa a baixo custo [3].

4.2 Procedimento Experimental

Optamos por utilizar o sistema de litografia por feixe de elétrons para fabricar microdispositivos ópticos uma vez que este era o único sistema disponível. Através da preparação adequada do resiste foram fabricadas microlentes espessas ($1\mu\text{m}$ a $4\mu\text{m}$), que posteriormente foram caracterizadas estruturalmente quanto à rugosidade e perfil utilizando as técnicas de microscopia de força atômica (AFM), microscopia eletrônica de varredura (SEM) e perfilometria. Além disso, em paralelo com a parte experimental, foram feitas simulações empregando o método de Monte Carlo usando o software CASINO da Leica Lithography Systems para determinar as condições reais de processamento em função do perfil desejado confrontando os resultados simulados com os experimentais.

4.2.1 Preparação das amostras

Foram utilizadas lâminas de silício de 75 mm de diâmetro, do tipo *p*, com orientação cristalográfica (100) e com uma resistividade de 10 a 20 Ω .cm. Inicialmente as lâminas foram submetidas a uma etapa de limpeza:

- 1) 5 minutos de lavagem em água deionizada (18 M Ω .cm)
- 2) 10 minutos em solução de 1 H₂O₂ : 4 H₂SO₄
- 3) 5 minutos de lavagem em água deionizada
- 4) 1 minuto em solução de 1 HF : 20 H₂O
- 5) 5 minutos em água deionizada

Utilizou-se como resiste o polimetacrilato de metila (PMMA) por ser largamente empregado em microóptica. O PMMA foi preparado empregando-se dois polímeros industriais (PMMA Elvacite 2010 de peso molecular 84K, e o PMMA Elvacite 2041 de peso molecular 350K ambos da ICI Acrylics Inc) e MIBK (*metil isobutil cetona*) ou xileno como solvente[28]. As soluções foram preparadas utilizando um agitador magnético para diluição do polímero, e durante a preparação tampou-se o béquer com uma folha de papel alumínio para evitar que o solvente evaporasse rapidamente.

4.2.2 Obtenção do filme espesso de PMMA

Para deposição do polímero no substrato foi utilizada a técnica de espalhamento por rotação (*spin coating*) [29] onde variamos a velocidade de rotação de 400 a 8000 rpm, de modo a obter um filme cuja espessura se adequasse ao nosso processo (entre 1 e 4 μ m). A lâmina, no início do processamento, que estava presa por sucção a vácuo, foi limpa com álcool isopropílico de modo a tirar particulados de sua superfície. Como promotor de aderência utilizamos HMDS (Hexameildisilazano). Para a etapa de remoção do solvente (*softbake*) começamos com uma temperatura de 120 °C por 60 minutos e, já prevendo um possível estilhaçamento dos filmes espessos fizemos uma rampa de cura que variou de 80°C a 200°C por 4 horas. Para todas as etapas térmicas foi utilizado um prato quente em ambiente atmosférico.

Para a preparação do polímero utilizamos inicialmente o PMMA Elvacite 2010 de peso molecular 84K com concentrações de 20% e 25% em peso de PMMA diluído em solvente MIBK. Para a deposição do polímero no substrato através do prato giratório (*spinner*), primeiramente foi utilizado álcool isopropílico com o intuito de desidratar e retirar particulados da superfície. Em seguida, utilizamos o HMDS como

promotor de aderência e então depositamos a solução em diferentes velocidades de rotação e tempo de 60 segundos. A seguir, realizou-se a etapa de evaporação do solvente (softbake) das amostras a uma temperatura de 120 °C por 60 minutos em placa quente, dando origem às curvas da figura 4.1.

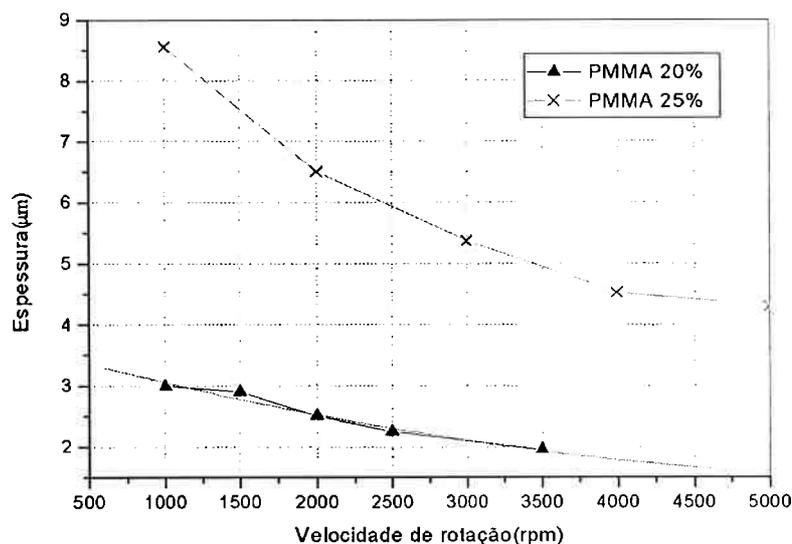


Figura 4.1: Curva de espessura para 20 e 25% de PMMA Elvacite 2010 diluído em MIBK em função da rotação.

Os filmes produzidos com a solução de 25% de PMMA 2010, embora não fossem totalmente homogêneos (presença de particulados no filme), se mostraram com uma rugosidade média menor que os filmes obtidos com a solução de 20% de PMMA 2010 (47 nm contra 106.5 nm). Para se obter um filme mais homogêneo, novas soluções com 20% e 25% de PMMA 2010 foram preparadas modificando-se o solvente utilizado (1:1 de MIBK:Xileno) e realizou-se a etapa de evaporação do solvente em 120 °C por 60 minutos em placa quente. Dessa forma obteve-se filmes com menor rugosidade (24 nm) para a concentração de 25%.

Mediu-se também o índice de refração utilizando a técnica de elipsometria. Para isso mediram-se cerca de 10 pontos da lâmina e calculou-se a média. O valor para as composições de 20% e 25% foi de 1,45 utilizando um comprimento de onda de 6328 nm. De acordo com a literatura o valor do índice de refração para o PMMA é de 1,49. A diferença no valor encontrado pode ser devido a presença de solvente no filme.

Já prevendo a ocorrência de estilhaçamento após a revelação do filme, foi feito um estudo sobre a etapa de evaporação do solvente (*softbake*) dos filmes produzidos, para se verificar a que temperatura o solvente começava a evaporar.

Depois da exposição, as amostras foram reveladas numa solução 3:1 de IPA:MIBK [22] por 3 minutos. Em seguida passaram por outra etapa térmica por 1 minuto a 130°C (*hardbake*). Na amostra sem rampa de aquecimento observamos o aparecimento de rachaduras no filme (Figura 4.2a) que podem ser devidas ao excesso de solvente presente no mesmo[30,31]. A amostra com rampa de aquecimento de 50°C a 150°C estava livre de rachaduras no filme (Figura 4.2b).

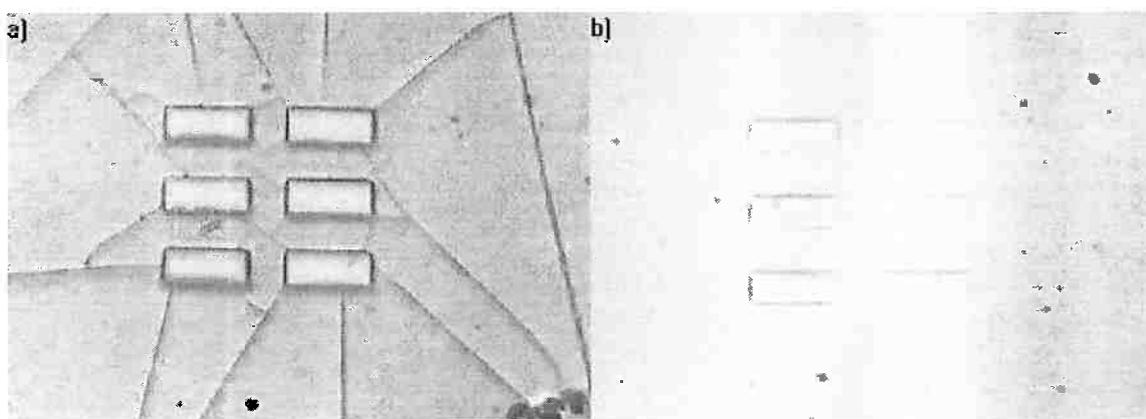


Figura 4.2: Amostra após a etapa de revelação: (a) sem e (b) com rampa de aquecimento.

A seguir mediu-se a curva de contraste para a amostra com rampa de aquecimento, como mostra a figura 4.3.

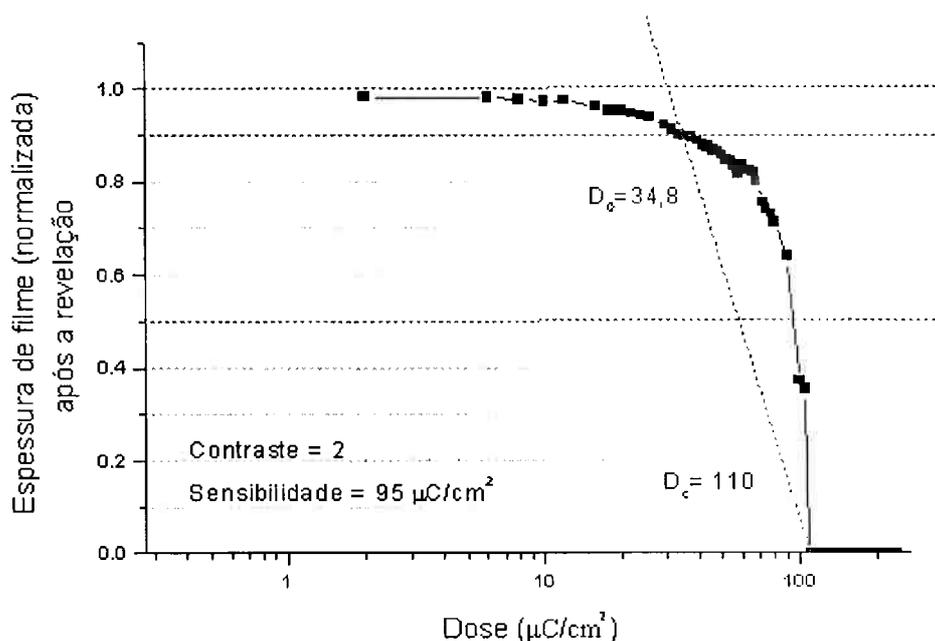


FIGURA 4.3 Curva de contraste do filme de PMMA de 3 μm.

Encontramos nesse caso um valor de contraste de $\gamma \sim 2$ e um valor de sensibilidade de $95 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. O PMMA 2010 foi escolhido inicialmente por possuir um peso molecular menor que o PMMA 2041, o que proporcionaria um valor mais baixo de contraste e sensibilidade [24], o que é interessante para fabricação de estruturas de relevo contínuo. No entanto, as amostras produzidas com a solução de 25% de PMMA, mesmo tendo menor rugosidade que as amostras produzidas com a solução de 20%, não tinham uma boa homogeneidade. O filme apresentava muitos particulados (figura 4.4), mesmo quando aumentávamos o tempo de preparo da solução.

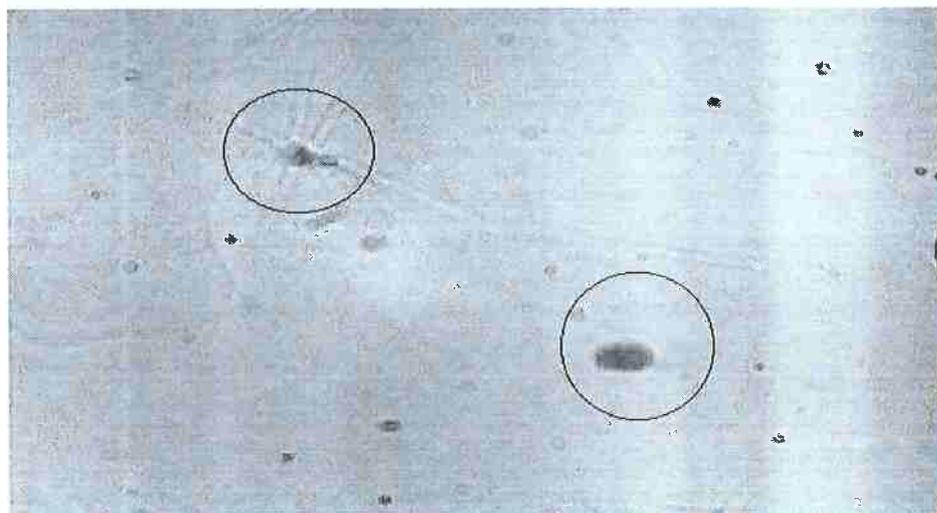


FIGURA 4.4 : Filme produzido com a solução de 25% de PMMA.

A solução encontrada foi trabalhar com o PMMA Elvacite 2041 de peso molecular 350K, que foi preparado em uma concentração de 10% em peso utilizando-se a mistura 1:1 de MIBK:Xileno como solvente. Ajustou-se a seguir a etapa de evaporação de solvente utilizando-se uma rampa de temperatura de 80°C a 180°C (passos de 30 minutos).

A seguir foram realizados estudos de determinação do contraste, sensibilidade e rugosidade média em função da energia de exposição (20, 25, 30keV) e do tempo de revelação. Na Figura 4.7a podemos observar que com o decréscimo da energia do feixe de elétrons ocorre um aumento no contraste, indo de 2,9 para 3,8 em um tempo de revelação de 379 segundos. Este comportamento indica que o resiste é primeiramente sensibilizado por elétrons primários e que os elétrons retroespalhados têm um efeito de segunda ordem devido à espessa camada de resiste utilizada ($\sim 2\mu\text{m}$). A Figura 4.5a também mostra que para tempos longos de revelação o contraste é reduzido, devido principalmente à taxa de dissolução das áreas não expostas, um comportamento típico de resistes positivos [32].

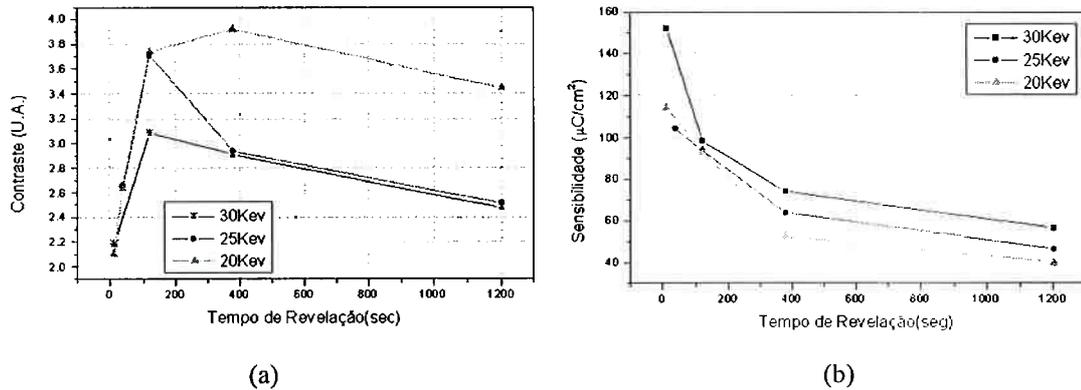


FIGURA 4.5 Influência do tempo de revelação e energia do feixe no valor: (a) do contraste; (b) da sensibilidade.

A figura 4.5b mostra que a sensibilidade aumenta com o decréscimo do tempo de revelação para uma mesma energia do feixe de elétrons, isso quer dizer que a sensibilidade do resiste é menor. Quando a energia do feixe diminui, de 30 para 20keV, uma melhora na sensibilidade é observada (em torno de $2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ por keV para um tempo de revelação de 379 segundos).

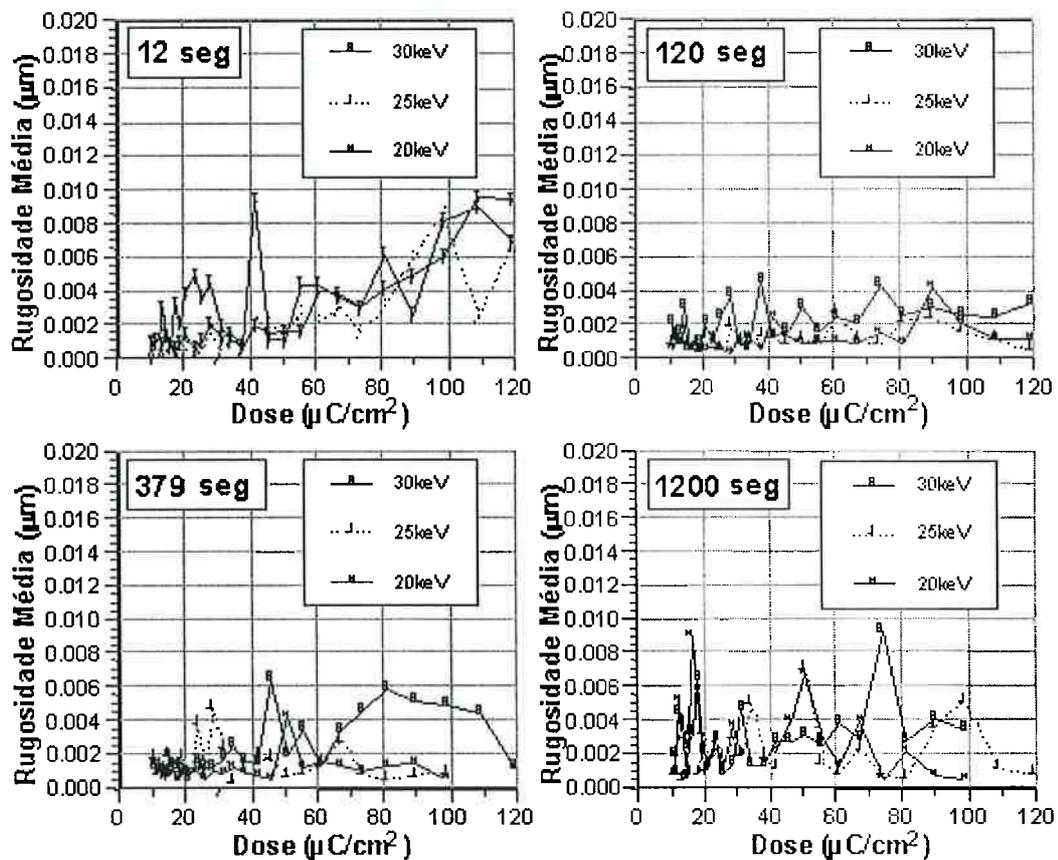


FIGURA 4.6 Influência do tempo de revelação e energia do feixe no valor na rugosidade média quadrática quadrática.

Os valores de contraste obtidos, muito maiores que 1, podem comprometer a rugosidade da superfície e o controle de espessura. Para investigar esta possibilidade mediu-se os valores de rugosidade para todas as condições testadas como mostra a figura 4.6. As medidas foram feitas através da varredura com o perfilômetro nas estruturas expostas, obtendo pelo equipamento automaticamente o valor da rugosidade média quadrática quadrática numa distância de 40 μ m.

Observamos que, utilizando o PMMA 2040, o valor da rugosidade média quadrática em qualquer situação era menor que o valor desejado para microóptica integrada ($\lambda/40 = 38$ nm). De todos os resultados obtidos nesse experimento, observamos que um valor de 30 keV para a energia do feixe e tempo de revelação em torno de 120 seg é o que mais se aproxima dos valores de contraste (3,09) e sensibilidade (98,5 μ C/cm²) desejados em nosso trabalho, mas ainda não é o ideal. Assim, estudamos a influência de mais dois parâmetros nos valores de contraste e sensibilidade: a concentração do revelador utilizado e a etapa térmica de pós-exposição (PEB). Fixando-se então o tempo de revelação e a energia do feixe variou-se a concentração de MIBK no revelador, obtendo-se os valores de contraste e sensibilidade mostrados na figura 4.7. Com o aumento da concentração de MIBK no revelador, o valor de contraste e de sensibilidade diminui. Este fato também foi observado por Cumming et. al [33].

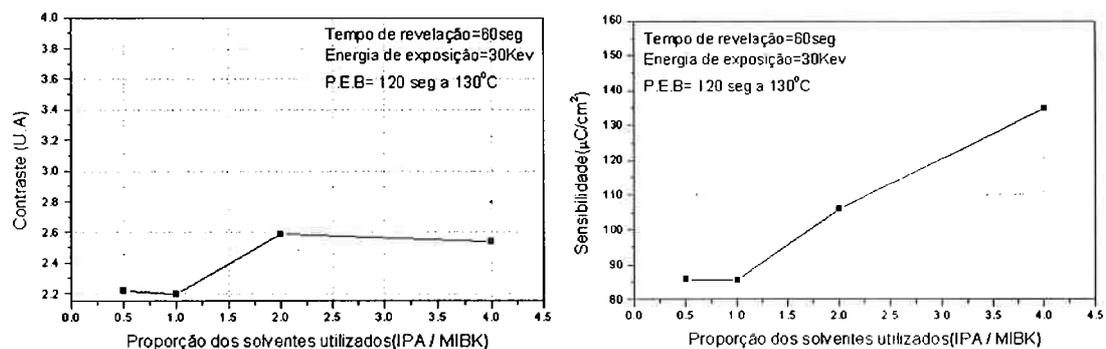


FIGURA 4.7 Influência do revelador nos valores de contraste e sensibilidade.

Também foi verificada a influência do revelador no valor da rugosidade como mostra a figura 4.8. Podemos observar que a variação na relação IPA/MIBK na solução não influi de modo significativo no valor de rugosidade. O valor de rugosidade fica em torno de 6 nm, um valor adequado para nosso trabalho.

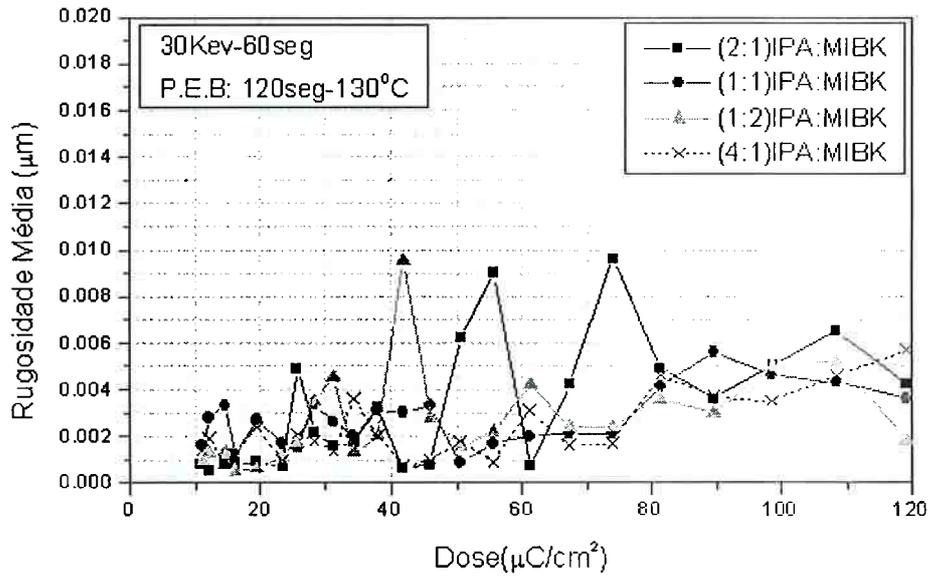


FIGURA 4.8 Influência da concentração do revelador no valor da rugosidade média quadrática.

Como ajuste final, utilizou-se uma energia de exposição de 30 keV, e os parâmetros de PEB e revelação foram variados conforme a tabela 4.2.

TABELA 4.2: Parâmetros de revelação e valores de sensibilidade e contraste para as amostras C1 a C3

Amostra	PEB	Tempo de revelação	Concentração do revelador	S ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	γ
C1	130°C a 120 seg	60 seg	(1:1) IPA:MIBK	159	2.4
C2	130°C a 240 seg	60 seg	(1:1) IPA:MIBK	147	2.2
C3	130°C a 240 seg	60 seg	MIBK	106	2.1

Como podemos observar, com o aumento da etapa de PEB ocorre a diminuição do valor de contraste e a melhora na sensibilidade. Usando como revelador apenas o MIBK observamos uma nova melhora na sensibilidade e uma redução no contraste. Fez-se novas amostras com um tempo de PEB maior e obteve-se um melhor resultado, como será visto a seguir.

4.3 Simulação usando o software CASINO

O software CASINO permite a simulação dos perfis das estruturas expostas desde que se forneça como entrada, além das condições de exposição e revelação, o chamado arquivo característico que relaciona a dissolubilidade do resiste em função da dose de exposição e do tempo de revelação (para um dado revelador). A obtenção do arquivo característico obedece o seguinte procedimento:

4.3.1 Cálculo do resiste removido:

Converte-se a espessura do resiste remanescente após a revelação na espessura do resiste removido em metros para cada dose de exposição, descartando todos os valores acima do qual todo o resiste é revelado;

4.3.2 Cálculo da solubilidade:

Divide-se a quantidade do resiste removido pelo tempo de revelação (em segundos) para gerar a curva de solubilidade do resiste em função da dose de exposição;

4.3.3 Encontrando a densidade de energia em função da profundidade:

Nesta etapa simula-se primeiramente o comportamento dos elétrons ao longo do substrato e do filme em condições iguais às reais, através do simulador de Monte Carlo (figura 4.9).

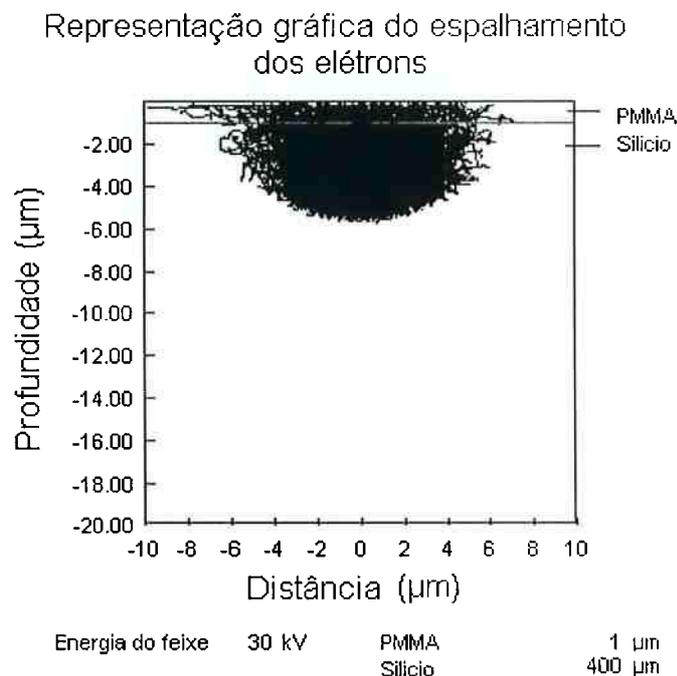


FIGURA 4.9 Simulação do comportamento de um feixe de elétrons de uma função delta com energia de 30 keV dentro de uma camada de 1 μm de PMMA.

Esse arquivo foi utilizado a seguir para a simulação da etapa de exposição. Para a etapa de exposição simulou-se uma estrutura utilizando o mesmo valor de largura de linha usada no processo experimental, a partir da qual extraiu-se um

arquivo de densidade de energia ao longo da profundidade do filme de resiste, mostrado na figura 4.10 obtido a partir da simulação da etapa de exposição.

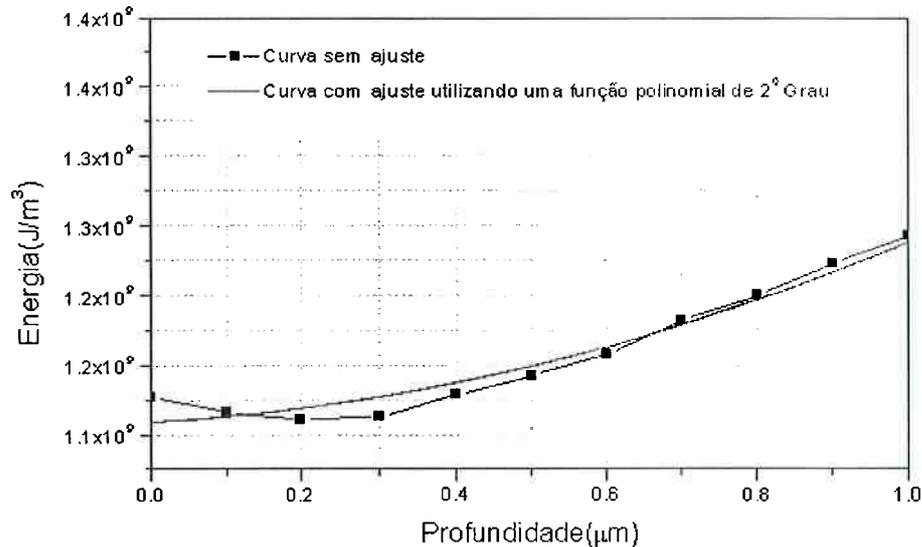


FIGURA 4.10: Perfil de densidade média de energia ao longo da profundidade da camada de resiste.

4.3.4 Calculando a densidade de energia para cada profundidade:

Com o perfil de densidade média de energia obtido (figura 4.10) faz-se um ajuste polinomial de 2º grau. Para cada profundidade encontrada em a) utilizamos a função polinomial utilizada para o ajuste da curva em c) para obter o valor de densidade de energia. Para cada valor de densidade de energia encontrado multiplicou-se pela expressão (Dt/Ds) , onde Dt é a dose de trabalho experimental para qual todo resiste é revelado e Ds é a dose utilizada na simulação da etapa c). Note que esta aproximação considera que $Dt \cong Ds$ tal que o efeito de proximidade seja similar.

a) Gerando o arquivo característico:

Nesta etapa constrói-se um gráfico utilizando os valores de \log_{10} da densidade de energia e solubilidade. Em seguida interpolou-se os valores de \log_{10} (solubilidade) em valores igualmente espaçados de \log_{10} (densidade de energia), utilizando 35 valores para cada década de densidade de energia. Com isso gerou-se os dados finais requeridos para o arquivo característico.

4.4 Simulação das microlentes

Antes de iniciarmos a simulação das microlentes, verificamos a confiabilidade do arquivo obtido gerando uma curva de contraste teórico e comparando-a com a curva de contraste obtido experimentalmente como mostra a Figura 4.11.

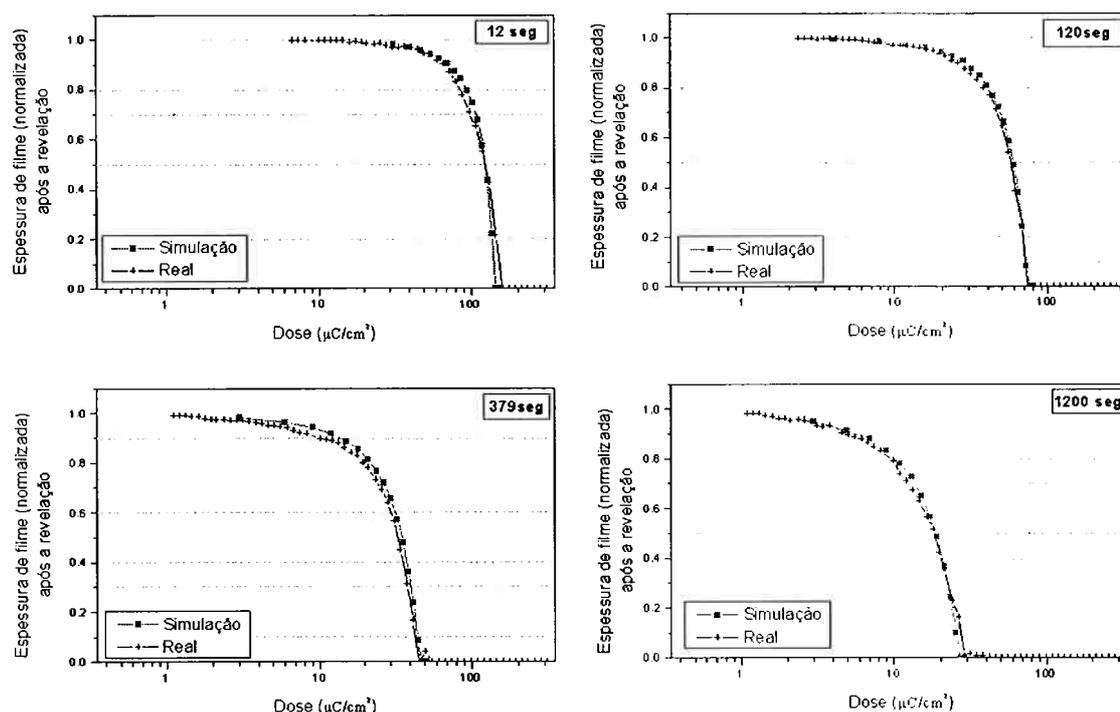


FIGURA 4.11 Comparação entre as curvas de contraste teórico e experimental para 4 tempos diferentes de revelação.

Como podemos observar, as curvas são semelhantes, o que comprova a exatidão do procedimento experimental para observação do arquivo característico e a confiabilidade do simulador.

4.4.1 Simulação de uma microlente simples

Para a simulação das microlentes várias simulações foram realizadas sendo que o perfil mais adequado encontrado é aquele mostrado na figura 4.12 e seus respectivos parâmetros estão apresentados na tabela 4.3. Observe que o procedimento adotado foi de subdividir a microlente em vários segmentos expostos com doses distintas.

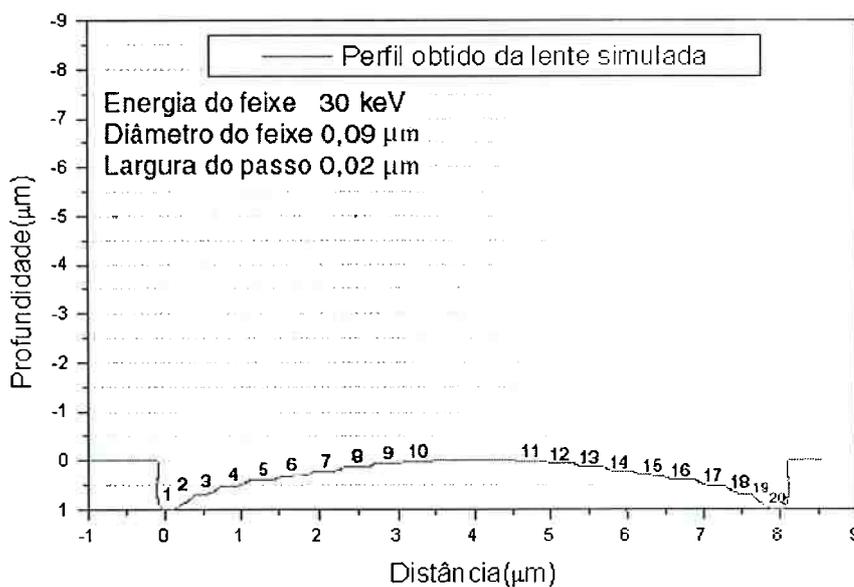


FIGURA 4.12 Perfil de um contorno arredondado já revelado. Para cada uma das 20 linhas subsidiárias (representada por números) atribuiu-se uma dose relativa em relação a dose inicial adotada (feixe 1).

TABELA 4.3 Parâmetros utilizados para a simulação das microlentes.

Feixe	Dose ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	Largura de linha	Distância entre os feixes (sobreposição)
1	80	0,15 μm	1 e 2 = 0 μm
2	61,4	0,55 μm	2 e 3 = -0,05 μm
3	54	0,49 μm	3 e 4 = -0,07 μm
4	48,8	0,49 μm	4 e 5 = -0,07 μm
5	44,4	0,47 μm	5 e 6 = -0,07 μm
6	38,5	0,47 μm	6 e 7 = -0,07 μm
7	29,6	0,47 μm	7 e 8 = -0,07 μm
8	20	0,47 μm	8 e 9 = -0,07 μm
9	10	0,47 μm	9 e 10 = -0,07 μm
10	2	0,47 μm	11 e 12 = -0,07 μm
11	2	0,47 μm	12 e 13 = -0,07 μm
12	10	0,47 μm	13 e 14 = -0,07 μm
13	20	0,47 μm	14 e 15 = -0,07 μm
14	29,6	0,47 μm	15 e 16 = -0,07 μm
15	38,5	0,47 μm	16 e 17 = -0,07 μm
16	44,4	0,47 μm	17 e 18 = -0,06 μm
17	48,8	0,49 μm	18 e 19 = -0,05 μm
18	54	0,49 μm	19 e 20 = 0 μm
19	61,4	0,55 μm	
20	80	0,15 μm	

Como mostra a Tabela 4.25 para a simulação da microlente, foram utilizados 20 feixes sendo que para cada um ajustou-se manualmente um valor de dose e largura de linha. Fez-se também um ajuste no valor da distância entre os feixes. Valores com sinal positivo (Ex: + 0,03 μm) representam feixes que estão afastados um do outro e valores com sinal negativo (Ex: - 0,07 μm) representam feixes que estão sobrepostos.

4.4.2 Simulação de uma matriz de microlentes

Os ajustes feitos no simulador para a obtenção de uma única microlente não podem ser utilizados para o caso quando tivermos uma matriz de microlentes justamente devido ao efeito de proximidade. Para isso fez-se novos ajustes (Tabela 4.26) obtendo-se um perfil de microlente como mostrado na figura 4.13.

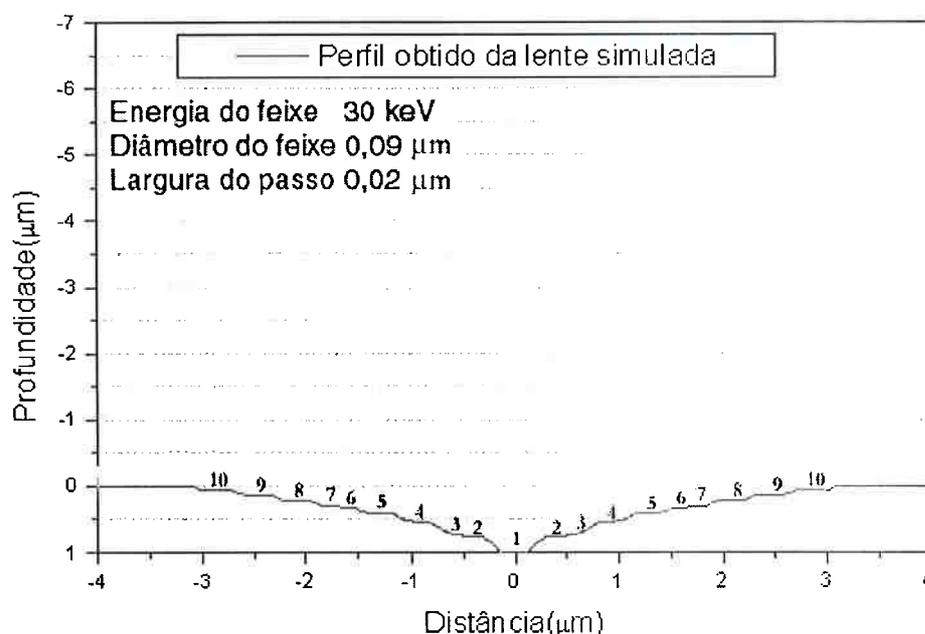


FIGURA 4.13 Perfil representando o encontro de duas lentes. Para cada uma das 18 linhas subsidiárias (representada por números) atribuiu-se uma dose relativa em relação a dose inicial adotada (feixe 1).

Uma vez obtido o perfil das microlentes e tendo todos os parâmetros necessários seguiu-se para a etapa de exposição de acordo com os resultados da simulação.

4.4.3 Obtenção das microlentes

Gerou-se a seguir um arquivo contendo a estrutura da microlente que posteriormente seria exposta no filme de PMMA pelo feixe de elétrons. Para isso

utilizou-se o software *Proxy-Writer* e gerou-se estruturas retangulares onde a cada uma delas associamos uma dose de exposição de acordo com o resultado obtido na simulação. A figura 4.14 mostra um exemplo da estrutura gerada:

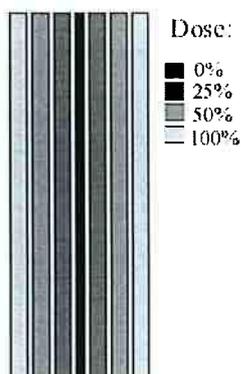


FIGURA 4.14 Exemplo da estrutura gerada para a obtenção das microlentes.

Para a exposição das amostras não foi possível utilizar os mesmos parâmetros do diâmetro e largura do passo utilizados na simulação devido ao limite do próprio equipamento. Os valores mais próximos que foram ajustados para a etapa de exposição foram: energia do feixe de 30 keV, diâmetro do feixe de 10nm e largura do passo de 32nm. Valores maiores de diâmetro do feixe e largura de passo não podem ser usados neste caso, pois segundo simulações e experimentos realizados eles comprometem o perfil das lentes obtidas.

4.4.3.1 Obtenção e caracterização da microlente simples

Nesta etapa utilizou-se o AFM e o SEM para analisar o perfil de superfície das microlentes simples obtidas. A seguir são mostradas medidas de AFM das microlentes simples obtidas a partir da simulação conforme mostrado na figura 4.15. Note que nesta etapa utilizou-se um filme de 1 μ m de espessura.

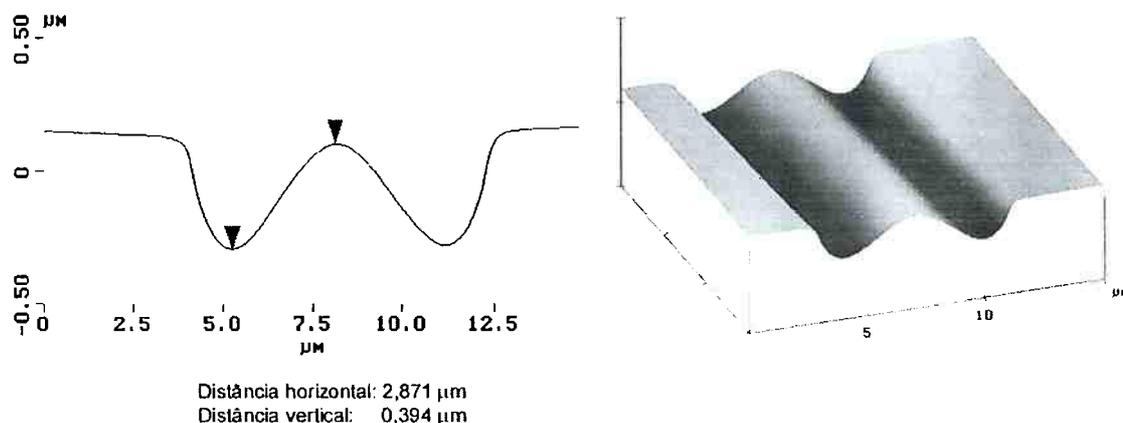
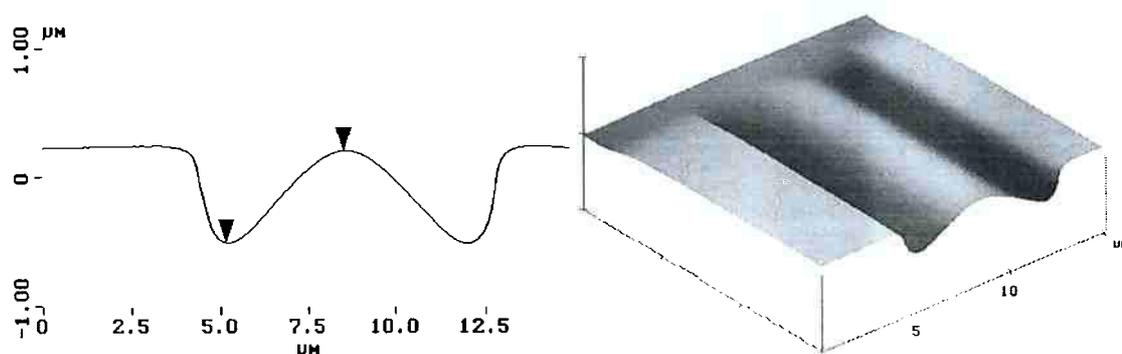


FIGURA 4.15 Medida de AFM de uma lente simples.

Embora pela simulação esperava-se obter lentes de $1\mu\text{m}$, as medidas de AFM mostraram que a profundidade máxima alcançada foi de $\sim 0.4\mu\text{m}$ para a lente simples. O simulador admite condições ideais de revelação e exposição, caso que pode não se aplicar na parte experimental onde temos vários fatores que influenciam no resultado final do perfil como por exemplo variações na corrente do feixe. Além disso, deve-se considerar que as estruturas utilizadas para gerar os arquivos de características para o simulador são de grandes dimensões ($>10\mu\text{m}$), o que pode causar discrepâncias em relação ao efeito conjunto de proximidade e de revelação para pequenas estruturas. Por outro lado, mesmo esse primeiro estudo das simulações indica o primeiro passo a seguir para gerar o arquivo de exposição e pode ser refinado em estudos subsequentes. Fez-se então ajustes no arquivo de exposição utilizado aumentando o valor de dose somente nas extremidades da lente de $80\mu\text{C}/\text{cm}^2$ para $130\mu\text{C}/\text{cm}^2$, com a finalidade de revelar as bordas da microlente, obtendo o perfil mostrado na figura 4.16.



Distância horizontal: $3,340\mu\text{m}$
Distância vertical: $0,710\mu\text{m}$

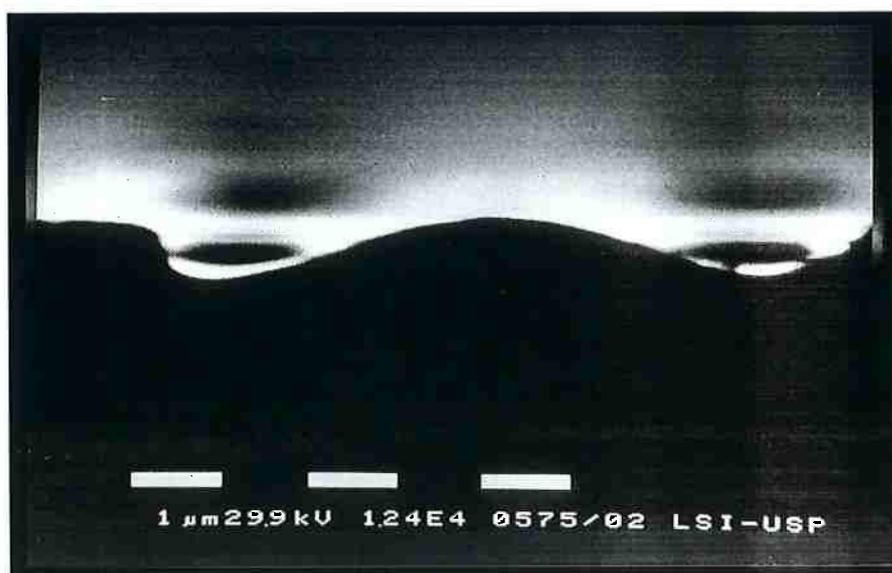


FIGURA 4.16 Perfil da microlente simples obtida após o ajuste. Imagem obtida pelo AFM (imagem superior) e imagem obtida pelo SEM (imagem inferior). Observe que na imagem SEM ocorre uma deformação devido ao material ser sensível a elétrons.

Como esperado, com o aumento da dose nas extremidades observou-se um aumento na profundidade revelada. Fez-se novos ajustes aumentando não somente o valor de dose nas extremidades, mas um aumento proporcional por toda a lente. Esse aumento proporcional pouco influencia os efeitos de proximidade. Fez-se então um aumento de 12%, 25% e 38% no valor das doses e produziu-se novas microlentes que são mostradas respectivamente nas figuras 4.17 , 4.18 e 4.19.

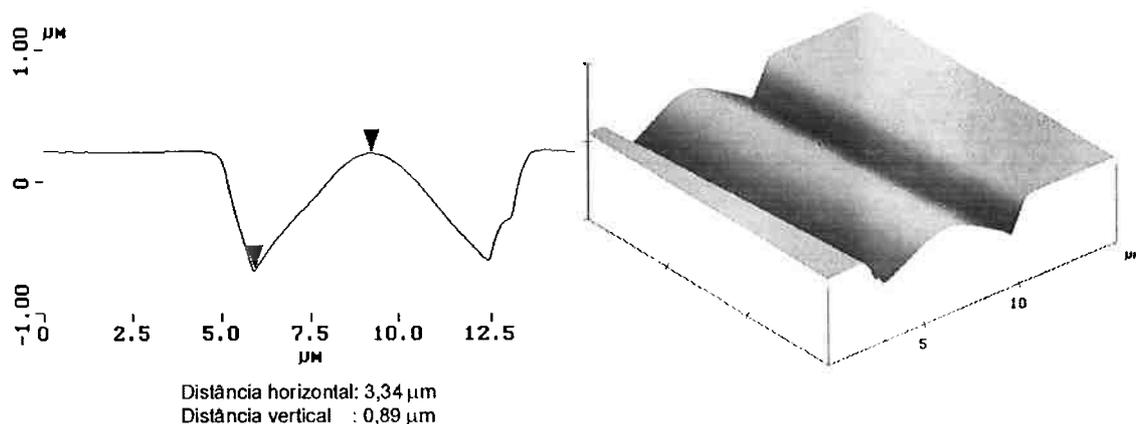


FIGURA 4.17 Perfil da microlente simples obtida após o ajuste de 12%.

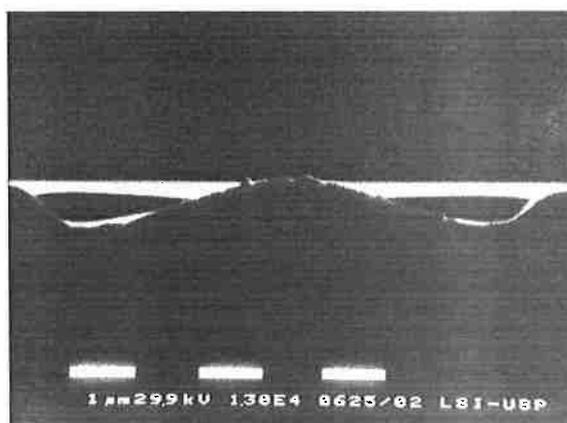
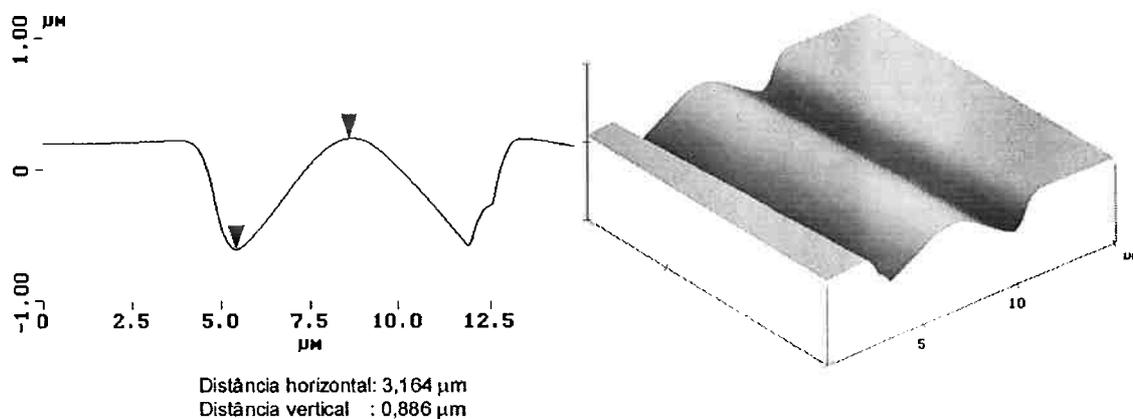


FIGURA 4.18 Perfil da microlente simples obtida após o ajuste de 25%. Imagem obtida pelo AFM (imagem superior) e imagem obtida pelo SEM (imagem inferior).

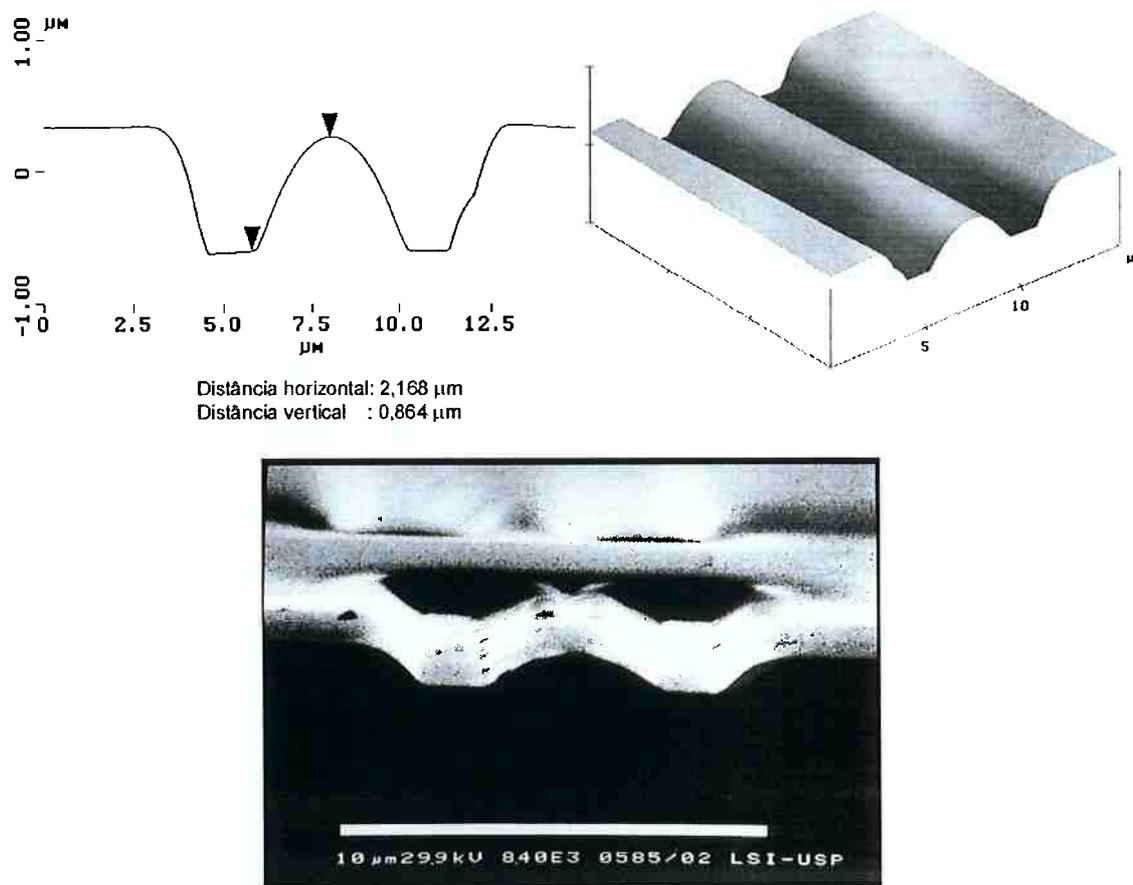


FIGURA 4.19 Perfil da microlente simples obtida após o ajuste de 38%. Imagem obtida pelo AFM (imagem superior) e imagem obtida pelo SEM (imagem inferior).

Como mostram as figuras 4.17 e 4.18, para um ajuste de 12% e 25% obteve-se uma profundidade revelada de $\sim 0.89 \mu\text{m}$ enquanto que para um ajuste de 38% obteve-se uma estrutura deformada devido ao excesso de exposição/revelação. De acordo com o obtido, a lente que sofreu o ajuste de 28% chegou mais próximo do desejado.

4.4.3.2 Obtenção e caracterização da microlente dupla

Nesta etapa utilizou-se o AFM e o SEM para analisar o perfil de superfície das microlentes duplas obtidas. A seguir são mostrados as primeiras medidas de AFM das microlentes duplas obtidas a partir da simulação conforme mostrado na figura 4.20. Para este caso também utilizou-se um filme de $1 \mu\text{m}$ de espessura.

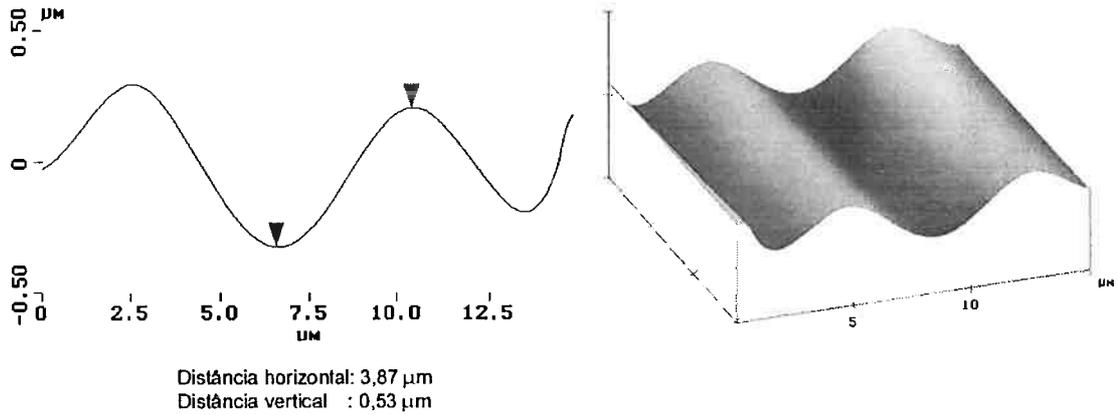


FIGURA 4.20 Perfil da lente dupla obtido pelo AFM.

Assim como no caso das microlentes simples, o primeiro ajuste realizado foi um ajuste local onde aumentamos a dose no centro e nas extremidades da lente de $80\mu\text{C}/\text{cm}^2$ para $130\mu\text{C}/\text{cm}^2$ como mostrado na Figura 4.21.

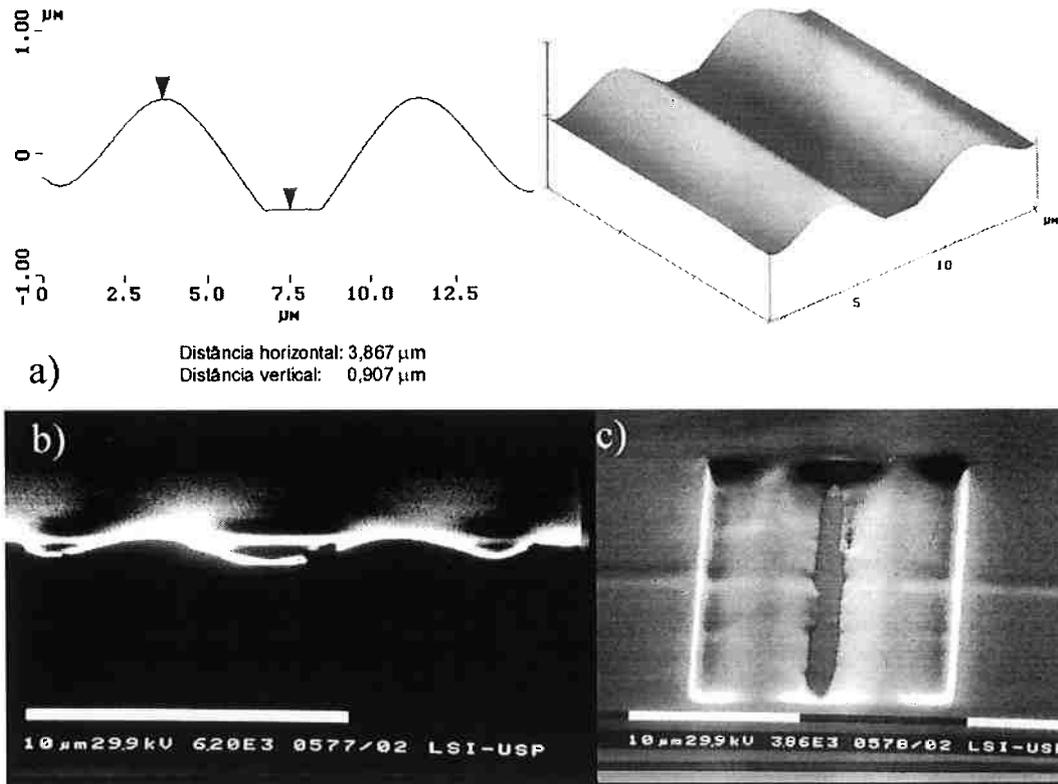


FIGURA 4.21 Perfil da lente dupla obtido pelo AFM.(a),e as imagens obtidas pelo SEM: seção transversal(b) e vista superior(c).

Como vemos na imagem do SEM obtida da microlente dupla, com a incidência do feixe de elétrons para se obter a imagem SEM ocorre a geração de artefatos que prejudicam a análise dessa imagem. Podemos observar que nas extremidades da lente a profundidade revelada foi menor quando comparada com o

centro da microlente, pois há uma maior contribuição de dose na região central sensibilizando assim uma região mais profunda do resiste.

Seguindo o mesmo procedimento das microlentes simples, a partir dos resultados obtidos na simulação fez-se um aumento de 12% e 25% no valor das doses e produziu-se novas amostras como mostrado nas figuras 4.22 e 4.23.

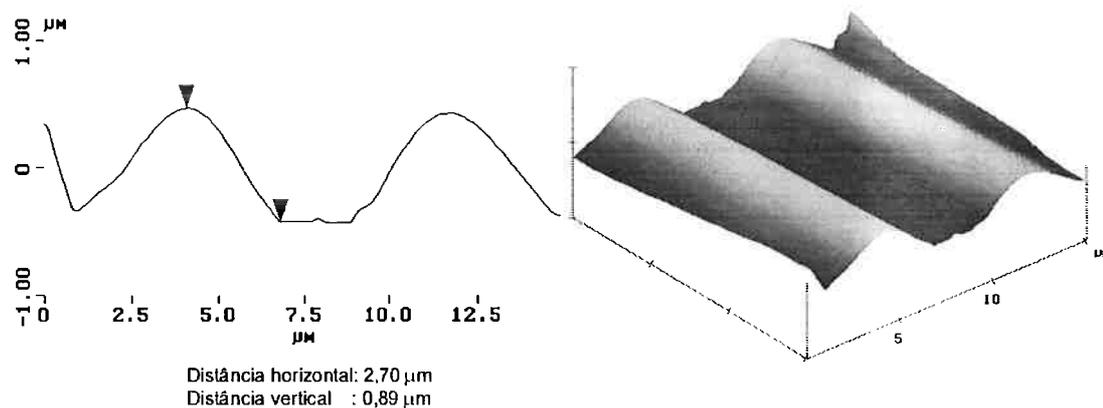


FIGURA 4.22 Figura obtida através do AFM da microlente após o ajuste de 12%.

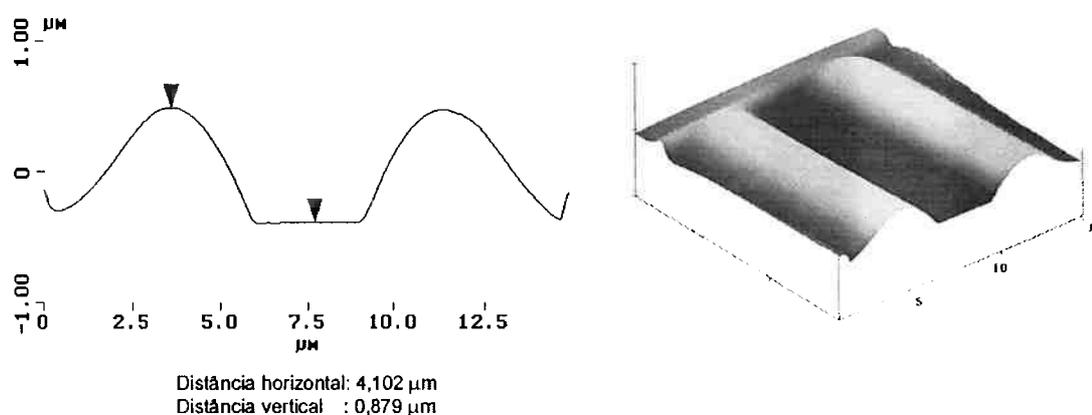


FIGURA 4.23 Figura obtida através do AFM da microlente após o ajuste de 25%.

Conforme observado nas figuras 4.21 a 4.23, as estruturas foram reveladas em excesso, fazendo com que o perfil ficasse cada vez mais estreito com o aumento da dose. O perfil que mais se aproximou foi a microlente que teve um ajuste na dose de 12% em relação aos parâmetros originais obtidos a partir da simulação. Uma série de outros ajustes foram feitos até chegar-se aos resultados da tabela 4.4 e figuras 4.24 e 4.25.

TABELA 4.4 Parâmetros utilizados para a simulação das microlentes.

Feixe	Dose ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	Largura de linha	Distância entre os feixes
1	122	$0,15\mu\text{m}$	1 e 2 = + $0,03\mu\text{m}$
2	51,6	$0,49\mu\text{m}$	2 e 3 = - $0,05\mu\text{m}$
3	46,9	$0,49\mu\text{m}$	3 e 4 = - $0,06\mu\text{m}$
4	40,8	$0,49\mu\text{m}$	4 e 5 = - $0,07\mu\text{m}$
5	31,4	$0,47\mu\text{m}$	5 e 6 = - $0,07\mu\text{m}$
6	21,2	$0,47\mu\text{m}$	6 e 7 = - $0,07\mu\text{m}$
7	10,6	$0,47\mu\text{m}$	7 e 8 = - $0,07\mu\text{m}$
8	2,1	$0,47\mu\text{m}$	8 e 9 = - $0,07\mu\text{m}$
9	2,1	$0,47\mu\text{m}$	9 e 10 = - $0,07\mu\text{m}$
10	2,1	$0,47\mu\text{m}$	
Distância de $0,4\mu\text{m}$ entre os feixes 10 e 11			
11	2,1	$0,47\mu\text{m}$	10 e 11 = $0\mu\text{m}$
12	2,1	$0,47\mu\text{m}$	12 e 13 = - $0,07\mu\text{m}$
13	2,1	$0,47\mu\text{m}$	13 e 14 = - $0,07\mu\text{m}$
14	10,6	$0,47\mu\text{m}$	14 e 15 = - $0,07\mu\text{m}$
15	21,2	$0,47\mu\text{m}$	15 e 16 = - $0,07\mu\text{m}$
16	31,4	$0,47\mu\text{m}$	16 e 17 = - $0,07\mu\text{m}$
17	40,8	$0,49\mu\text{m}$	17 e 18 = - $0,06\mu\text{m}$
18	46,9	$0,49\mu\text{m}$	18 e 19 = - $0,05\mu\text{m}$
19	51,6	$0,49\mu\text{m}$	19 e 20 = + $0,03\mu\text{m}$
20	100,7	$0,15\mu\text{m}$	

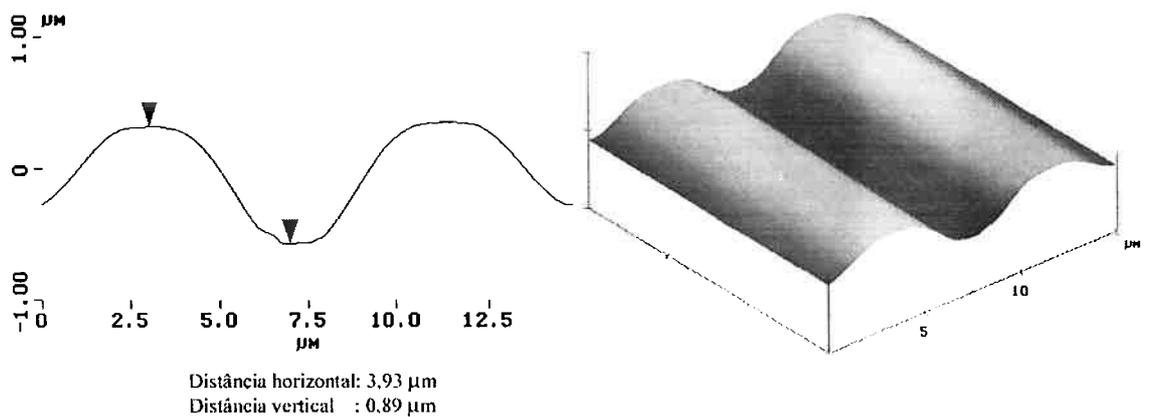


FIGURA 4.24 Perfil da microlente obtida após o ajuste.

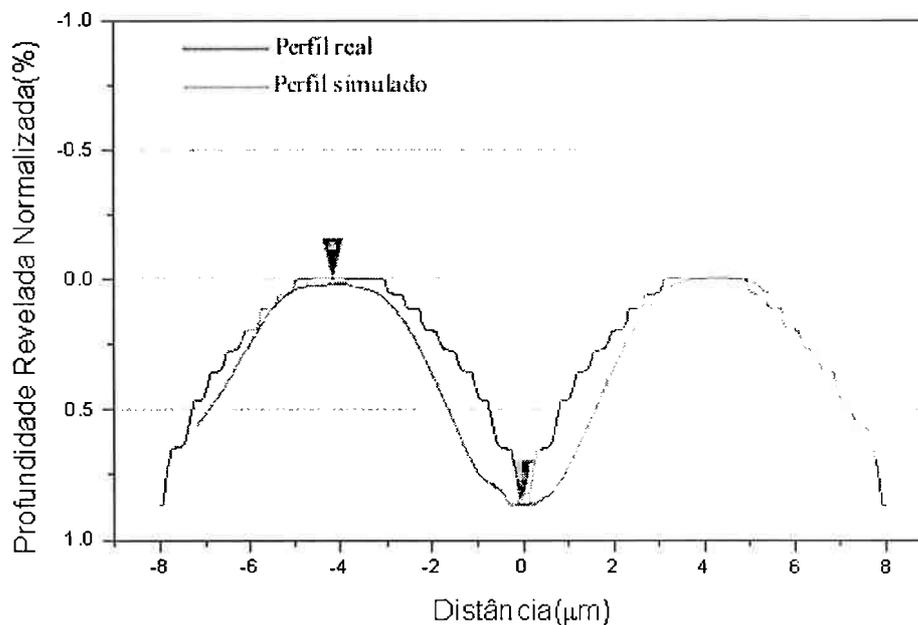


FIGURA 4.25 Comparação entre o perfil simulado e real da microlente obtida.

Como observado na figura 4.25, o ajuste realizado proporcionou um perfil mais próximo ao obtido na simulação. Para que o perfil simulado coincida com o perfil real deve-se diminuir a dose na região entre as duas microlentes.

4.4 Resultados

O estudo realizado no item anterior serviu de subsídio para a fabricação de microlentes sobre fotodiodos HMSM mostrados na figura 4.26.

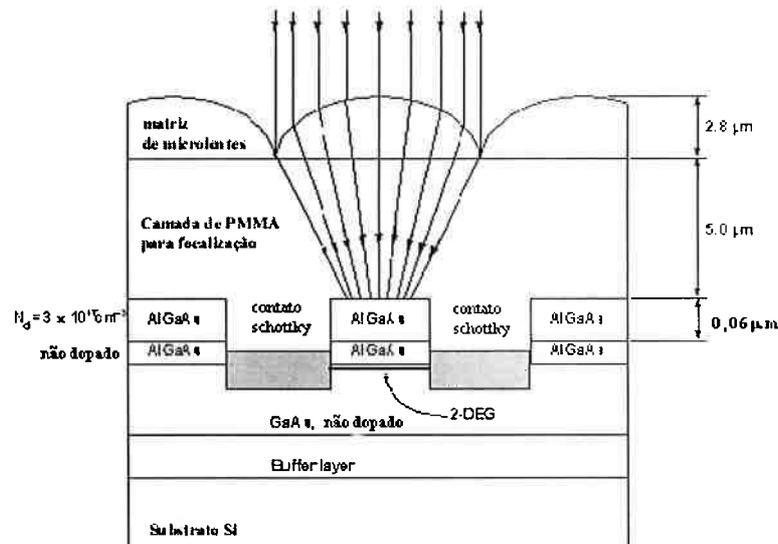


FIGURA 4.26 Estrutura de uma micro lente integrada sobre um fotodiodo MSM.

Para este propósito o fotodiodo deve ser primeiramente recoberto com uma camada de $5\mu\text{m}$ de espessura de resiste para ajuste de foco da matriz de microlentes (pedestal). Uma segunda camada de resiste de $\sim 2.8\mu\text{m}$ de espessura foi colocada sobre a primeira camada e cuidadosamente exposta pelo feixe de elétrons para obter a forma de uma micro lente. Note que para isso um cuidadoso alinhamento deverá ser feito para alinhar a região que será exposta com o fotodiodo.

O dispositivo HMSM onde a matriz de microlentes foi fabricada possui uma área total de $200 \times 200\mu\text{m}^2$ e um perfil interdigital tradicional. Linhas de Ti-Au com uma largura de $4\mu\text{m}$ e espaçamentos de 5 ou $6\mu\text{m}$ foram utilizadas. A figura 4.27 mostra um dispositivo HMSM com largura de linhas/espacos iguais a $4\mu\text{m}$.

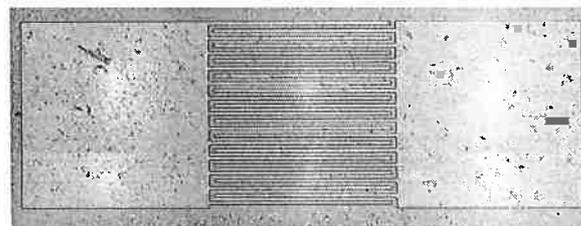


FIGURA 4.27 Vista de topo de uma estrutura HMSM padrão, sem as microlentes. Os contatos são de $200 \times 200\mu\text{m}^2$. Linhas de Ti-são de $200\mu\text{m}$ de comprimento por $4\mu\text{m}$ de largura. Espaçamentos entre linhas são de $4\mu\text{m}$ de largura.

Para este trabalho utilizaram-se duas camadas de resiste SNR200, uma para ajuste da distância focal, com espessura de $5\mu\text{m}$ e outra para fabricação das microlentes com espessura de $2.8\mu\text{m}$. O perfil curvilíneo foi obtido fracionando-se a

microlente em 17 segmentos que receberam doses diferentes de exposição. A figura 4.28 mostra as estruturas de microlentes assim obtidas.

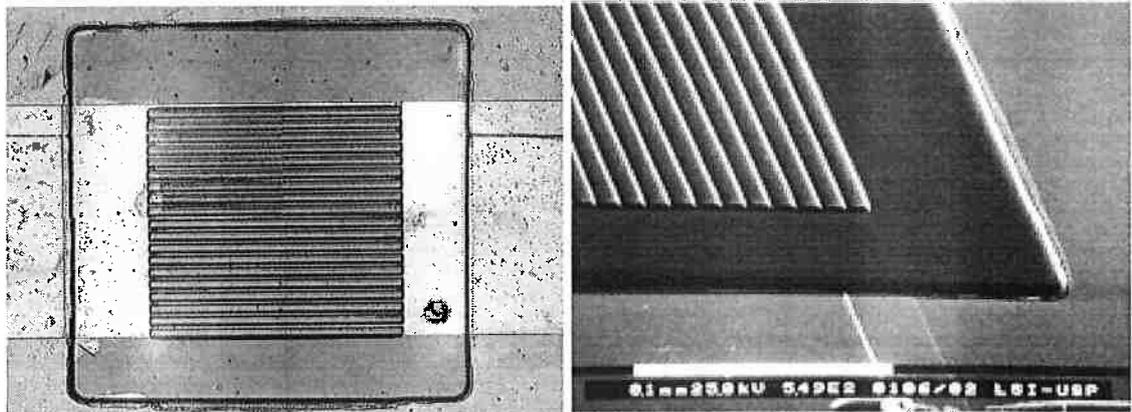


FIGURA 4.28 a) Vista de topo da estrutura HMSM com as microlentes integradas; b) Foto SEM mostrando detalhes das microlentes.

A figura 4 mostra a resposta da estrutura HMSM + microlentes quando iluminada por um laser de estado sólido de 850 nm e 0,5mW. As curvas na figura 4 representas as seguintes situações: (a) iluminação da estrutura HMSM tradicional; (b) iluminação da estrutura HMSM + pedestal e (c) iluminação da estrutura HMSM + conjunto completo de lentes para tensões aplicadas de 0 V a 10 V. A estrutura HMSM com pedestal apresenta um aumento da corrente de 90% quando polarizada com 9V e a estrutura completa apresent um aumento de 260% na fotocorrente para mesma tensão de polarização quando comparadas à estrutura HMSM tradicional.

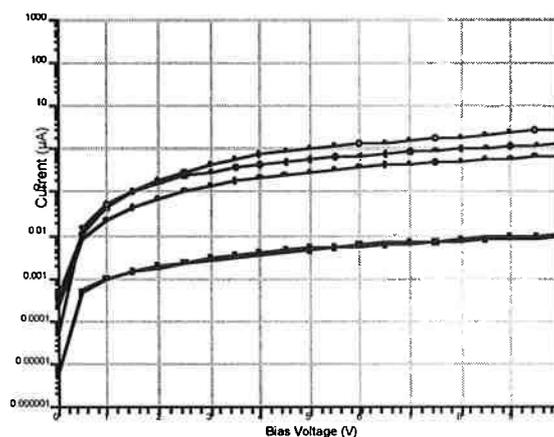


FIGURA4.29 Comparação da resposta cc da estrutura HMSM tradicional e com a matriz de microlentes (IMA-HMSM), no escuro e quando iluminada por 0,mW de luz 850 nm. B HMSM, escuro; G IMA-HMSM, escuro; J HMSM, 0.5 mW; A HSM com pedestal, 0.5mW; E IMA-HMSM, 0.5 mW.

5. Conclusões e Perspecivas Futuras

5.1 Litografia para Microdispositivos MEMS

O processo de revelação líquida desenvolvido mostrou que as principais etapas que afetam o desempenho do resiste SAL601-ER7 são as etapas de pós-aquecimento e revelação. Estas etapas devem ser controladas rigorosamente para se obter resultados reprodutíveis. Sugere-se que em processos utilizando resistes amplificados quimicamente as etapas de aquecimento tenham um controle de temperatura melhor que $\pm 1^\circ\text{C}$.

Com o auxílio do método estatístico de experimentos foi possível reduzir significativamente o número de experimentos necessários para a otimização do processo.

Investigou-se a influência de parâmetros secundários de processamento, notadamente temperatura de pré-aquecimento e tempos de espera. Concluiu-se que com o aumento da temperatura de pré-aquecimento e mantendo-se o intervalo de tempo (a condição ambiente) entre exposição e pós-aquecimento rigorosamente constante, aumenta-se consideravelmente a resolução e estabilidade do processo.

Mostrou-se também que o resiste SAL601-ER7 é um candidato potencial para a confecção de máscaras, apresentando alta resolução e adequação a etapas em fornos de convecção.

Apresentou-se um novo método baseado em pacotes de energia para realizar a transferência de um processamento em placas quentes para um processamento em forno de convecção.

5.2 Litografia para Microdispositivos Ópticos

Desenvolveu-se um processo tripla camada com exposição por feixe de elétrons empregando o resiste de tom negativo SAL601-ER7 com o objetivo de compará-lo ao processo tripla camada padrão utilizado no IMEC.

O processo desenvolvido possui as seguintes vantagens:

- a) Melhor sensibilidade (cerca de 4,5 vezes mais sensível, reduzindo proporcionalmente o tempo de exposição) por empregar o efeito de amplificação química;
- b) Maior linearidade na definição de estruturas com larguras de diversos tamanhos por ser um resiste negativo que não sofre o efeito de inchamento uma vez que emprega uma matriz polimérica do tipo novolac;
- c) Tolerância a variações na dose de exposição compatível com a tolerância observada em processos CMOS com portas de 0,25 μ m de largura;
- d) Alta compatibilidade com SOG não dopado do tipo silicato devido à sua capacidade de suportar temperaturas até 220°C sem apresentar efeitos de degradação, o que evita o surgimento de rachaduras nos filmes SOGs.

5.3 Perspectivas futuras

Resistes amplificados quimicamente apresentam vantagens que os tornam indispensáveis nos processos litográficos avançados. Assim, o estudo aprofundado destes resistes, investigando a influência de fatores considerados secundários, é de grande importância.

Neste trabalho não se estudou os mecanismos pelos quais os resistes amplificados quimicamente deterioram a qualidade da **imagem** ao longo do tempo. Apenas constatou-se o fato e propôs-se um procedimento para se conviver com ele.

O estudo e uso do processo sililação em resistes amplificados quimicamente para litografia por feixe de elétrons ainda está em seu início. Uma proposta bastante atrativa seria o estudo da sililação para baixas energias do feixe de elétrons, tipicamente na faixa de 200V a 2000V. Nesta faixa de energia os elétrons depositados no resiste estão confinados à região da superfície. Desta forma não ocorre o efeito de proximidade e pode-se obter perfis de incorporação de silício mais parecidos com os observados em litografia óptica.

Referências Bibliográficas

- [1] BERLIN, A. A.; AND GABRIEL, K. J. Distributed MEMS: New Challenges for Computation. IEEE Computation Science & Engineering. pp. 12 – 16, January-March 1997.
- [2] MADOU, M. Fundamentals of Microfabrication. pp. 1, 1997.
- [3] HERZIG, H. P., *Micro-optics: Elements, systems and applications*, Taylor&Francis Ltd., London, 1997.
- [4] MARKUS, K. W. Developing Infrastructure to Mass-Produce MEMS. IEEE Computation Science & Engineering. pp. 49-54, January-March 1997.
- [5] 248nm .13um
- [6] ITRS 99
- [7] sst jan2000 (ITRS tables)
- [8] von Büneau, R.; Owen, G.; and Pease, R.F.W. Depth of focus enhancements in optical lithography. Journal of Vacuum Science and Technology. v.B10, n.6, pp.3047-54, Nov./Dec. 1992.
- [9] Kamon, K.; Miyamoto, T.; Myoi, Y.; Nagata, H.; and Tanaka, M. Photolithography system using modified illumination. Japanese Journal of Applied Physics. v.32, n.1-1A, pp.239-43, Jan. 1993.
- [10] Gentili, M.; Grella, L.; Luciani, L.; Mastrogiacomo, L.; and Scopa, L. Electron beam lithography for fabrication of 0.1µm scale structures in thick single level resist. Microelectronic Engineering. v.14, pp.159-71, 1991.
- [11] Waldo, W. Techniques and Tools for Optical Lithography. In: Glendinning, W.B. and Helbert, J.N. Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications. Noyes Publications, 1991. Cap. 4, p. 248.
- [12] Levenson, M.D. Extending Optical Lithography to the Gigabit Era. Solid State Technology. v.38, n.2, pp.57-66, feb 1995.
- [13] Blais, P. and Michaels, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: Glendinning, W.B. and Helbert, J.N. Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 16.
- [14] sst may 2000 motorola
- [15] aquec scalpel
- [16] figura scalpel usada
- [17] sdberger jmgibson apl 57:153, 1990.
- [18] prevail ibm journal 455
- [19] ieeego98 sup
- [20] ieeego98 bk

- [21] site InIs
- [22] MADOU, M. Fundamentals of Microfabrication, pp. 275-323.
- [23] GUCKEL, H. Microactuators and Micromachines, Proceedings of the IEEE, august 1998, vol. 86, no. 8, pp. 1586-1593.
- [24] BISCHOFBERGER, R., ZIMMERMANN, H. and STAUFERT, G. Low-cost HARMS process. Sensors and Actuators. Elsevier A61 (1997) pp. 392-399.
- [25] MADOU, M. J., *Fundamentals of Microfabrication*, pp. 42-90, CRC Publications, 1997.
- [26] DANZIGER, Y.; HASMAN, E.; FRIESEM, A.A.; LOHMANN, A.W.; *Multilevel diffractive elements for generalized wavefront shaping*, Opt. Eng., 35(9):2556-65, september, 1996.
- [27] Gale, M.T., Rossi, M., Pedersen, J. and Schutz, H., Fabrication of continuous relief micro optical elements by direct laser writing in photoresist, Optical Engineering 33, p 3556, 1994.
- [28] Matsui S., Kojima Y., Ochiai Y., and Honda T.; High-resolution focused ion beam lithography, Journal of Vacuum Science & Technology B 9(5):2622, Sep-Oct (1991).
- [29] Gale, M.T., Rossi, M., Pedersen, J. and Schutz, H., Fabrication of continuous relief micro optical elements by direct laser writing in photoresist, Optical Engineering 33, p 3556, 1994.
- [30] Stauffer, J.M., Oppliger, Y., Regnault, P., Electron beam writing of continuous resist profiles for optical applications, Journal of Vacuum Science & Technology B, 10(6):2526, Nov-Dec 1992.
- [31] Oppliger Y., Sixt P., Stauffer J.M., Mayor J.M., Regnault P., Voirin G., One-step 3D shaping using a gray-tone mask for optical and microelectronic applications, Microelectronic Engineering 23, p.449-454 (1994)
- [32] Free, B.A., Meadows, G.A., Projection ion lithography with aperture lenses, Journal of Vacuum Science & Technology, 15(3):1028, 1978.
- [33] Dashner W., Long P., Laarson M., Lee S., Fabrication of diffractive optical elements using a single optical exposure with a grey level mask, Journal of Vacuum Science & Technology B 13(6):2729-2731, (1995)
- [34] Inoki, C.K., *Litografia por Feixe Eletrônico de Baixa Energia* tese de doutorado, EPUSP, São Paulo, março, 1998.
- [35] WILLSON, C.G.; ITO, H.; FRÉCHET, J.M.J.; TESSIER, T.G.; AND HOULIHAN, F.M. Approaches to the Design of Radiation-Sensitive Polymeric Imaging Systems with Improved Sensitivity and Resolution. *Journal of The Electrochemical Society*. v. 133, n.1, pp.181-7, Jan. 1986.
- [36] REICHMANIS, E. AND THOMPSON, L.F. Chemistry and process for deep-UV resists. *Microelectronic Engineering*. v.14, pp.215-26, 1991.
- [37] VOLLENBROEK, F.A. AND SPIERTZ, E.J. Photoresist Systems for Microlithography. In: *Advances in Polymer Science* 84. Springer-Verlag, 1988.
- [38] MOREAU, W.M. *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.597.
- [39] MOREAU, W. M. The survival of single film resites. *ukn*. pp. 1-14B, 1990.
- [40] TAYLOR, G.N.; STILLWAGON, L. E.; AND VENKATESAN, T. Gas-Phase-Functionalized Plasma – Developed Resists: Initial Concepts and Results for Electron-Beam Exposure. *Journal of The Electrochemical Society*. v. 131, n.7, pp. 1658-64, July 1984.
- [41] ROLAND, B. Surface Imaging Techniques. *Microcircuit Engineering* –90. pp. 11-
- [42] INOKI, C.K. *Litografia por Elétrons de Baixa Energia com Resiste de Amplificação Química*. Tese de Doutorado PEE/LSI/USP. pp. 24-30, 1999.

- [43] SEABRA, A.C., Estudo de Resistes Amplificados Quimicamente e Sililação em Litografia por Feixes de Elétrons. Tese de Doutorado PEE/EPUSP. pp. 103, 1997.
- [44] SHAW, J.M.; HATZAKIS, M.; BABICH, E.D.; PARASZCZAK, J.R.; WITMAN, D.F.; AND STEWART, K.J. A simplified silylation process. *Journal of Vacuum Science and Technology*. v.B7, n.6, pp.1709-16, Nov./Dec. 1989.
- [45] GOETHALS, A.M.; LOMBAERTS, R.; ROLAND, B.; AND VAN DEN HOVE, L. An in-depth study of the Influence os Silylation Conditions on the silicon constrast. *Microcircuit Engineering* -90. pp. 37-40, November 1991.
- [46] GOGOLIDES, E.; YANNAKOPOULOU, K.; NASSIOPOULOS, A.G.; TSOIS, E.; AND HATZAKIS, M. Characterization of a positive-tone wet silylation process with the AZ5 214 photoresists. *Microcircuit Engineering* -92. pp. 37-40, October 1993.
- [47] BABICH, E.; PARASZCZAK, J.; GELORME, J.; MCGOUEY, R.; AND BRADY, M. Comparison of vapor and liquid phase silylation processes of photoresists. *Microcircuit Engineering* -90. pp. 47-50, November 1991.
- [48] INOKI, C.K. Litografia por Elétrons de Baixa Energia com Resiste de Amplificação Química. Tese de Doutorado PEE/LSI/USP. pp. 24-30, 1999.
- [49] ROLAND, B. Surface Imaging Techniques. *Microcircuit Engineering* -90. pp. 11-
- [50] BAIK, K.H.; VAN DEN HOVE, L.; AND ROLAND, B. A comparative study between gas and liquid phase silylation for the DESIRE process. *Microelectronic Engineering*. v.17, pp.69-74, 1992.
- [51] COOPMANS, F. AND ROLAND, B. DESIRE: A New Route to Submicron Optical Lithography. *Solid State technology*. v.30, n.6, pp.39-9, June 1987.
- [52] REUHMEN-HUISKEN, M.E.; O'NEIL, J.; AND VOLLENBROEK, F. A. Improvement of the DESIRE process using PROMOTE technology. *Microcircuit Engineering* -90. pp. 41-46, November 1991.
- [53] DIJKSTRA, J.; VAN DE VEN, G.; AND KALTER, H. Dry development of the DESIRE process in a DECR reator. *Microcircuit Engineering* -90. pp. 455-458, November 1991.
- [54] WEIL, A.; JOUBERT, O.; PANIEZ, P.; DEBAENE, F.; PONS, M.; AND SAGE, D. Melt Flow of the Silylated areas during the DESIRE process. *Microcircuit Engineering* -92. pp. 251-254, October 1993.
55. COOPMANS, F. AND ROLAND, B. DESIRE: A New Route to Submicron Optical Lithography. *Solid State Technology*. v.30, n.6, pp.93-9, June 1987.
56. OP DE BEECK, M. AND VAN DEN HOVE, L. Silylation of novolac based resists: Influence of deep-ultraviolet induced crosslinking. *jvstb*. v.10, n.2, pp.701-14, Mar./Apr. 1992.
- [57] CANTOR, B., Graduate Student Series in Materials Science and Engineering. *Microelectronic Materials*, CRM Grovenor Editor, pp. 513-517.
- [58] HERMAN, I. P., Optical Diagnostics for thin film processing. Academic Press. pp. 135-137.
- [59] LOPES, J. C. D., Espectroscopia no Infravermelho. Apostila Didática. Setembro [60] MANSANO, R.D., Apostila de Aulas de Etapas de Processos II. Fatec-SP. Segundo semestre de 1999.
- [61] Seabra, A.C., Construção e Carcaterização de um, Equipamento de Corrosão por Plasma, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1989.
- [62]- Manual do Software CASINO, da Leica Lihography Systems Ltd.
63. Eliphaz Wagner Simões, Rogerio Furlan, Marcos Tadeu Pereira, and Dong Ho Choi, "Flow Based Characterization of the Operation of a Microfluidic Amplifier", *Microscale Thermophysical Engineering (MTE)*, Vol. 6, Issue 2, May 2002, pp. 141 – 153.

64. Eliphas Wagner Simões, Rogerio Furlan e Marcos Tadeu Pereira, "*Microdispositivos Aplicados a Escoamentos de Fluidos*", aceito para a InTech Brasil, publicação oficial do Distrito 4 (América do Sul) da ISA (*The Instrumentation, Systems, and Automation Society*)
65. Eliphas Wagner Simões, Rogerio Furlan, and Marcos Tadeu Pereira, "*Numerical analysis of a microfluidic oscillator flowmeter operating with gases or liquids*", Technical Proceedings of the fifth International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM 2002)", ISBN 0-9708275-7-1, San Juan, Puerto Rico, pp. 36 – 39, 2002.
- [67]- Kley,E.-B., *Continuous Profiling Writing by Electron and Optical Lithography*, Microelectronic Engineering, 34, 3-4,p.261,December,1997.

São Paulo, 29 de Julho de 2002

At.: Dr. José Fernando Perez
Diretor Científico da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Ref: PIPE 01/08711-6 FASE II
Empresa: TORR Microsistemas Integrados de Pressão Ltda.
Proposta: Encapsulamento completo de sensores para monitoração da pressão sanguínea.

Prezado Dr. Perez,

Apresento a seguir informações que visam esclarecer algumas questões apontadas pelo assessor no que se refere a proposta: "Encapsulamento completo de sensores para monitoração da pressão sanguínea" apresentada no âmbito do programa PIPE Fase II.

Entendemos que o transdutor nacional terá condições de competir com os similares importados. Há, no entanto, necessidade de se considerar que, assim como ocorre com outros produtos de conteúdo tecnológico elevado, a alta taxa de obsolescência destes produtos faz com que o momento de introdução do mesmo no mercado seja decisivo para o sucesso do negócio. Neste sentido solicitamos a colaboração da diretoria e assessoria da FAPESP para a pronta definição da situação do projeto.

No aguardo de vossa resposta,

atenciosamente,

Prof. Dr. Edgar Charry Rodrigues
Coordenador do Projeto