

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FEEC – FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DSIF – DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES, INSTRUMENTOS E
FOTÔNICA.

**CARACTERIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE
FOTOLITOGRAFIA APLICADOS NA FABRICAÇÃO DE
DISPOSITIVOS MICROMÉTRICOS MOS E MICROSSISTEMAS**

*Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica e Computação da
Universidade Estadual de Campinas para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.*

Autor: Nemer Paschoal Fioravante Junior

Orientador: Dr. Peter Jürgen Tatsch

Co-orientador: Dr. Stanislav Moshkalyov

Banca examinadora:

Dr. Peter Jürgen Tatsch

Dr. Antonio Carlos Seabra

Dr. José Alexandre Diniz

Dra. Maria Beny Pinto Zakia

Campinas – Outubro de 2004

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

F511c Fioravante Junior, Nemer Paschoal
Caracterização e otimização dos processos de
fotolitografia aplicados na fabricação de dispositivos
micrométricos MOS e microssistemas / Nemer Paschoal
Fioravante Junior. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientadores: Peter Jürgem Tatsch, Stanislav Moshkalyov
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Microeletrônica. 2. Fotolitografia. 3. Microssistemas
eletromecânicos. I. Tatsch, Peter Jürgen. II. Moshkalyov,
Stanislav. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV.
Título.

Titulo em Inglês: MOS devices and MEMS photolithographic fabrication processes
characterization and optimization

Palavras-chave em Inglês: Photolithography, Microelectronics, MEMS,
Microelectromechanical systems

Área de concentração: Microeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Antonio Carlos Seabra, José Alexandre Diniz e Maria Beny Pinto
Zakia

Data da defesa: 20/10/2004

*Aos meus Pais, irmão e
namorada, pelo apoio, confiança e
incentivo.*

Agradecimentos

Agradeço...

A Deus por sempre estar a meu lado ao longo de minha caminhada;

Aos meus Pais pelo apoio em todos os momentos de minha vida;

Ao meu Orientador Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch pela amizade, apoio e dedicação na realização deste trabalho;

Ao Professor Dr. Stanislav Moshkalyov pela amizade, apoio, companheirismo e dedicação;

Ao Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart pela oportunidade;

A todos os professores do CCS, em especial ao Prof. Diniz apoio, atenção e amizade;

A todos os técnicos e funcionários do CCS, em especial à Mara, Godoy, Regina e Márcia cujo apoio foi determinante na conclusão do trabalho;

Ao pessoal do LPD-IFGW/UNICAMP, Antônio Celso Ramos e Antônio Augusto de Godoy von Zuben.

Ao pessoal do LEME/LNLS e IFGW/UNICAMP, pela realização das fotos por microscopia eletrônica;

Ao CenPRA pela fabricação do conjunto de máscaras;

A todos os amigos que também desenvolvem trabalhos no CCS.

Aos amigos da Republica pela amizade e companhia durante estes anos de Unicamp.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes entidades:

- CAPES - Auxílio Bolsa de Mestrado
- CCS/Unicamp
- DSIF/Unicamp
- IFGW/Unicamp
- LME/LNLS

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é o aperfeiçoamento dos processos de fotolitografia utilizados no Centro de Componentes Semicondutores (CCS) da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Visa determinar os parâmetros de maior relevância do processo de fotolitografia utilizado no CCS para fabricação de estruturas micrométricas e a partir da sua caracterização identificar os seus valores ótimos. Os parâmetros tais como o contraste, a aderência, a resolução e a dimensão mínima dos padrões fotogravados foram estudados a fim de se determinar as possibilidades de melhoria e as limitações dos processos. No decorrer deste trabalho foi utilizado basicamente o fotorresiste AZ 5214E com o qual foi possível o desenvolvimento de processos repetitivos que permitiram a fabricação de estruturas periódicas com largura de até $2\mu\text{m}$ e estruturas isoladas com largura de até $0,8\mu\text{m}$.

Abstract

The aim of this work is to improve the photolithographic processes of the CCS/Unicamp. This work attempts findout and optimize the most significant process parameters for the fabrication of micrometric structures. Contrast, adhesion, resolution, and minimum dimension for the shapes were studied in order to improve the process and also determine their limitations. A procedure for the processing of AZ 5214E photoresist was established so that periodic structures with dimension as low as $2\mu\text{m}$ and isolated structures down to $0,8\mu\text{m}$ can be produced reproductively.

Sumário

Trabalho Publicado Pelo Autor	viii
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Introdução geral	02
1.2 Objetivo da Dissertação	02
1.3 Organização da Dissertação	03
2 TECNOLOGIA PLANAR DE FABRICAÇÃO DE DISPOSITIVOS	04
2.1 Processos de obtenção de filmes	05
2.2 Fotolitografia	05
2.2.1 Máscara	07
2.2.2 Sistemas de exposição	08
2.2.3 Alinhamento	16
2.2.4 Fotorresistes	18
2.2.5 Função Transferência de Modulação	22
2.3 Processo de corrosão	24
2.4 Processo de Metalização por <i>Lift-off</i>	25
3 PROCESSO DE FOTOLITOGRAFIA	27
3.1 Descrição das etapas do processo padrão	27
3.1.1 Limpeza	28
3.1.2 Desidratação	29
3.1.3 Aplicação do promotor de aderência	29
3.1.4 Aplicação do fotorresiste	30
3.1.5 Cura para estabilização do fotorresiste (<i>Softbake</i>)	32
3.1.6 Exposição do fotorresiste	34
3.1.7 Revelação	36
3.1.9 Cura completa do fotorresiste (<i>Hardbake</i>)	38
3.1.10 Processamento do substrato	39
3.1.11 Remoção do fotorresiste	40
4 EXPERIMENTAL	41
4.1 Materiais utilizados	41
4.1.1 Produtos químicos utilizados nos processos de limpeza	42
4.1.2 Produtos utilizados no processo de fotogravação	42
4.1.3 Equipamentos Utilizados para realização do processo	43
4.2 Preparação das amostras	46
4.2.1 Caracterização das lâminas	47

4.2.2 Clivagem das lâminas	48
4.2.3 Limpeza das lâminas para o processo de oxidação	49
4.2.4 Oxidação úmida	50
4.2.5 Limpeza orgânica	52
4.3 Obtenção da curva de contraste	52
4.3.1 Condições experimentais	53
4.4 Estudo dos efeitos da variação da dose de energia nos padrões fotografados	56
4.4.1 Condições experimentais	56
4.5 Estudo da influência da espessura do filme de fotorresiste no processo de fotografação	57
4.5.1 Condições experimentais	57
5 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO	59
5.1 Equipamentos utilizados	61
5.2 Estudo da curva de contraste	62
5.2.1 Estudo da variação da temperatura de cura para estabilização do fotorresiste	65
5.3 Estudo da variação da largura de linha com a dose de energia	67
5.4 Estudo da espessura do filme de fotorresiste	70
5.5 Características das etapas do processo de fotografação	74
5.5.1 Desidratação do substrato	74
5.5.2 Aplicação do promotor de aderência	74
5.5.3 Aplicação do fotorresiste	74
5.5.4 Cura para estabilização do fotorresiste	75
5.5.5 Exposição do fotorresiste	75
5.5.6 Revelação do fotorresiste	75
5.5.7 Cura completa do fotorresiste	76
5.5.8 Remoção dos resíduos de fotorresiste por plasma	76
5.5.9 Processo	76
5.5.10 Remoção do fotorresiste	77
6 PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA O PROCESSO DE FOTOGRAFAÇÃO	78
6.1 Introdução	78
6.2 Dispositivos fabricados utilizando o processo de caracterização proposto	79
6.2.1 Com o filme de fotorresiste de espessura de ~1,46 μm	80
6.2.2 Com o filme de fotorresiste de espessura de ~ 0,7 μm	85
7 CONCLUSÃO	90
Referências Bibliográficas	92

Trabalho Publicado Pelo Autor

Nemer P. Fioravante, Leandro T. Manera, Stanislav A. Moshkalyov, José A. Diniz, Peter J. Tatsch, Hugo R. J. Grados and Jacobus W. Swart , "Precise Control of Micron and Submicron Feature Dimensions in Photolithography for MOS and MEMS Applications", 19th Symposium on Microelectronics and Technology - SBMICRO 2004, Porto de Galinhas, PE, September 7-11, 2004, Electrochemical Society Proceedings, Vol. 2004-3, pp. 369-374, ISBN 1-56677-416-0

1 Introdução

1.1 Introdução geral

A microfabricação ou a tecnologia de miniaturização resulta de vários procedimentos sofisticados onde a etapa chave é a microlitografia. A microlitografia permite definir a estrutura que será transferida para o substrato [1].

Na microeletrônica o desejo de se fazer os dispositivos cada vez menores e pastilhas mais densas é motivado pelo aumento da velocidade dos dispositivos, menor dissipação de potência e menor custo por dispositivo fabricado [2,3]. Isto só é possível com avanços nos processos de fabricação dos circuitos integrados, entre eles o processo de fotolitografia.

Assim, historicamente passou-se de componentes discretos, transistores, diodos e resistores, para os circuitos integrados de baixa escala de integração (SSI – *Small Scale Integration*), média escala de integração (MSI – *Medium Scale Integration*), alta escala de integração (LSI – *Large Scale Integration*), muito alta escala de integração (VLSI – *Very Large Scale Integration*) e a ultra-alta escala de integração (ULSI – *Ultra Large Scale Integration*). Atualmente estamos começando a era GSI (*Giga Scale Integration*) onde uma pastilha pode conter até um bilhão de dispositivos. O número de dispositivos eletrônicos em uma pastilha está dobrando aproximadamente a cada 18 meses [3,4].

Esta evolução é consequência do desenvolvimento da tecnologia planar que permitiu a aceleração da produção em série (*batch process*).

Depois da descoberta do efeito transistor em 1947 foram fabricados os primeiros transistores de germânio que foram substituído progressivamente pelo silício que é atualmente o material dominante na indústria de semicondutores. Isto ocorreu devido a fácil obtenção do óxido de silício que serve como máscara durante os processo de fabricação dos CIs e como camada de isolamento com diferentes funções no circuito fabricado [5,6].

Mas não é apenas a microeletrônica que utiliza o processo de microlitografia. A idéia de miniaturizar dispositivos mecânicos surgiu bem antes da microeletrônica começar o seu desenvolvimento. Nos anos 50 já existiam inúmeros laboratórios tentando utilizar a mesma tecnologia-base da microeletrônica para produzir sensores, com o objetivo de reduzir custos e, se possível, integrar sensores e circuitos eletrônicos numa mesma pastilha [7]. Atualmente isso se tornou realidade com a concepção dos sistemas micro-e nanoeletromecânicos, ou MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) e NEMS (*Nano-Electro-Mechanical Systems*). Estes microssistemas são produzidos em lâminas de silício, assim como os CIs, e sua construção só é possível devido aos processos de Litografia.

1.2 Objetivo da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo o aprimoramento dos processos de fotolitografia utilizados no Centro de Componentes Semicondutores da Universidade Estadual de Campinas (CCS-UNICAMP) e o desenvolvimento de novos processos de fotogração para fabricação de estruturas micrométricas e sub-micrométricas.

Este trabalho usou como base os dados do Relatório Técnico Processo de Fotolitografia do CCS [8].

No desenvolvimento do trabalho estudamos as etapas envolvidas nos processos de fotogração e sua influência no resultado final do processo de fotolitografia.

Os resultados estão sendo aplicados com sucesso nas etapas de fabricação de dispositivos nMOS, CMOS e microssistemas fabricados atualmente no CCS, em diferentes materiais como Si, SiO₂ e polisilício.

1.3 Organização da Dissertação

No Capítulo 2 apresentamos a descrição detalhada da técnica de fotolitografia, as características requeridas dos processos, os tipos de equipamentos utilizados para fotogração e os tipos de resinas utilizadas.

No Capítulo 3 apresentamos a descrição detalhada do processo de fotolitografia.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação dos procedimentos experimentais deste trabalho, onde relacionamos os procedimentos de preparação das amostras usadas nos experimentos, as condições experimentais e apresentamos os equipamentos utilizados.

No Capítulo 5 expomos os resultados da caracterização dos processos de fotolitografia e os equipamentos utilizados na caracterização.

No Capítulo 6 apresentamos os procedimentos propostos para os processos de fotolitografia do CCS e os resultados obtidos com a aplicação destes processos.

No Capítulo 7 destacamos as conclusões do trabalho e as sugestões para sua continuidade.

2 Tecnologia Planar de Fabricação de Dispositivos [09]

A tecnologia planar constitui a base dos processos de fabricação dos dispositivos e circuitos integrados. Ela permite o processamento localizado da superfície do semicondutor: dopando-a, removendo-a por ataque químico, ou por processo físico contactando regiões com linhas metálicas ou de outras formas [09].

Com esta tecnologia é possível a fabricação de dispositivos como resistores, diodos e transistores. Este processo também é utilizado para a fabricação de microssistemas.

O processamento localizado da superfície da lâmina de Si é realizado pelo crescimento de um filme protetor sobre a superfície e pela abertura de janelas neste filme, expondo a superfície de Si que será processada em seguida. Os filmes comumente empregados para esta função são os isolantes como o óxido de silício (SiO_2) ou nitreto de silício (Si_3N_4). A abertura das janelas nos filmes é feita pelo processo fotolitográfico.

Descreveremos em seguida algumas das etapas básicas envolvidas na tecnologia planar, começando com a obtenção do filme isolante, seguida do processo de fotogração para definição e abertura das janelas no filme.

2.1 Processos de obtenção de filmes [06]

Oxidação: É um processo químico de reação do silício com o oxigênio puro (oxidação seca) ou com vapor d'água (oxidação úmida) para formar um filme de dióxido de silício. Para acelerar a reação é necessário aquecer a lâmina a uma temperatura na faixa de 900°C a 1200°C . O processo é feito em fornos especiais de alta temperatura.

Deposição por vapor químico: Também conhecido como CVD (*chemical vapor deposition*) é um processo no qual gases ou vapores reagem quimicamente levando a formação de um filme sólido sobre o substrato. O método CVD pode, por exemplo, ser usado para depositar dióxido de silício ou nitreto de silício sobre o substrato de silício.

Metalização: É um método de deposição de um filme de metal que pode ser feita, por exemplo, através da evaporação de metais em uma câmara de alto vácuo. A evaporação pode ser feita por um feixe de elétrons que atinge o metal a ser evaporado ou por filamentos que aquecem o metal. O objetivo principal da metalização é fazer a interconexão de vários componentes do circuito integrado e a formação de eletrodos para contato e de capacitores.

2.2 Fotolitografia

O objetivo do processo de fotolitografia é a obtenção de uma máscara de fotorresiste sobre o substrato que fará a proteção seletiva deste substrato durante o processo subsequente da tecnologia planar.

Inicialmente são feitos os projetos das máscaras onde são determinados os padrões que serão transferidos para o filme de fotorresiste.

O processo de fotolitografia consta de uma seqüência de etapas.

Na primeira etapa é depositada sobre o substrato uma fina camada de fotorresiste (polímero líquido fotossensível à luz ultra-violeta) por centrifugação em um *spinner*. Após a aplicação do fotorresiste é realizada uma cura em temperatura adequada (em estufa ou placa quente) para a evaporação do solvente e solidificação do fotorresiste.

Depois, a camada de fotorresiste é exposta à luz UV através uma máscara em uma fotoalinhadora como é mostrado na figura 2.1. A máscara contém partes claras e opacas que definem o padrão que será transferido ao filme de fotorresiste.

Existem dois tipos de fotorresiste: um positivo e um negativo.

No caso do fotorresiste positivo, as áreas do filme de fotorresiste expostas à luz ultravioleta apresentam um aumento na taxa de dissolução em um solvente específico. Quando é utilizado fotorresiste negativo, as áreas do fotorresiste expostas à luz ultravioleta apresentam diminuição na taxa de dissolução em um solvente específico [10,11].

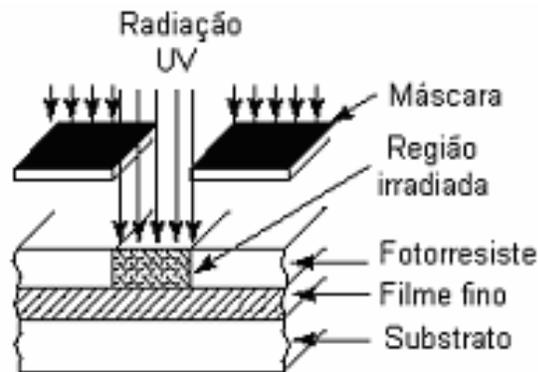


Figura 2.1 Exposição do filme de fotorresiste [10]

Após a exposição é realizada a revelação química do fotorresiste. O revelador dissolve as partes expostas ou não expostas dependendo do tipo de fotorresiste utilizado no processo, como é mostrado na figura 2.2.

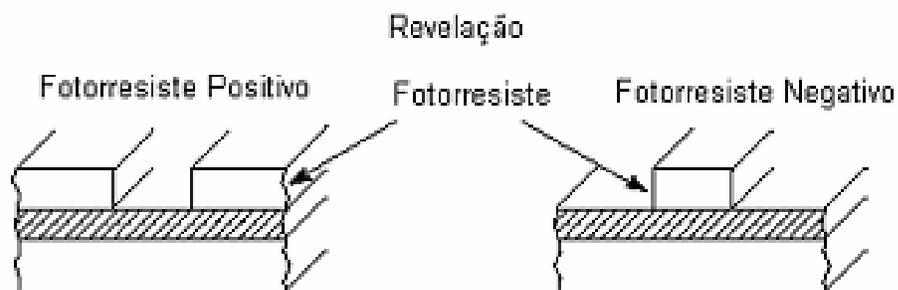


Figura 2.2 Características do filme de fotorresiste positivo e negativo após exposição e revelação [10]

Após o processo de revelação temos uma máscara de fotorresiste que fará a proteção do substrato durante o processo subsequente que pode ser de corrosão ou deposição de filmes.

2.2.1 Máscara

As máscaras são reproduções de alta qualidade dos projetos *CAD* utilizados nas etapas de fotogração da tecnologia planar [12]. Nas máscaras estão desenhados os padrões que serão transferidos para o filme de fotorresiste.

A máscara é constituída por uma placa de material transparente à luz UV e superfície bem plana. O material normalmente é quartzo. Inicialmente a placa deve ser coberta por um filme sólido de material opaco como Cr ou Cr_2O_3 . Sobre este filme deposita-se uma emulsão foto-sensível ou eletro-sensível. Projeta-se neste filme de emulsão o padrão geométrico idealizado pelo projetista do dispositivo ou circuito, por um dos seguintes processos [09]:

- Projeção óptica a partir de um desenho em folha com alto contraste constituído de uma folha de *mylar* coberta com *rubylith* (camada plástica semitransparente). Os padrões são definidos pelo corte e retirada da camada de *Rubylith*
- Escrita direta sobre a emulsão por projeção de pulsos de luz, comandada por computador a partir de um sistema *CAD* (Computer Aided Design).
- Escrita direta sobre a emulsão por um feixe de elétrons, comandada por computador.

A emulsão exposta à radiação fica sensibilizada.

Os últimos dois processos são os mais usuais atualmente.

Após esta etapa é realizada a revelação química da emulsão (similar à revelação na fotografia), que dissolve e remove a parte mais sensibilizada, abrindo janelas que expõe o filme opaco. Em seguida uma etapa de corrosão química remove o filme exposto. A emulsão restante, é removida por um solvente. Desta

forma obtém-se uma máscara que possui agora regiões opacas e regiões transparentes, de acordo com a geometria desejada.

A figura 2.3 mostra os tipos de máscara utilizados no processo fotolitográfico.

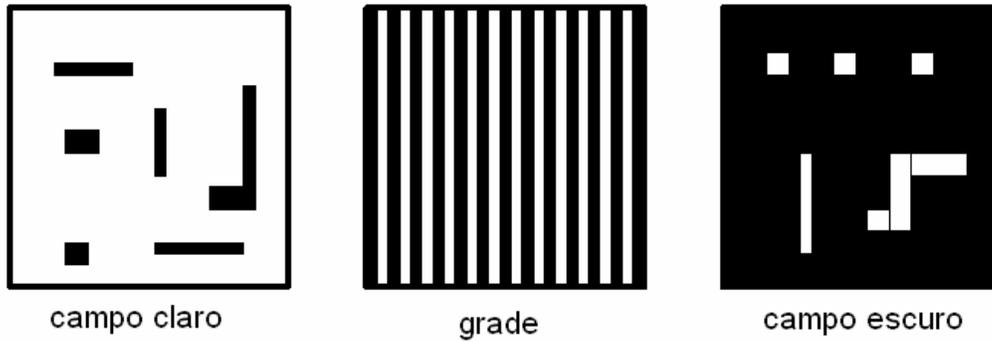


Figura 2.3 Máscaras utilizadas no processo fotolitográfico [13]

2.2.2 Sistemas de exposição [01, 10, 14,15]

Os equipamentos de exposição são os equipamentos utilizados para fazer a transferência ou replicação dos padrões da máscara para o filme de fotorresiste.

Os sistemas de exposição convencionais (ópticos) são de dois tipos

- Sistemas de reprodução por contato ou proximidade
- Sistemas de reprodução por projeção

2.2.2.1 Replicação por contato ou por proximidade

Estes são os mais simples dos sistemas de replicação empregados em fotolitografia. Utilizam a imagem projetada de uma máscara para fazer a transferência dos padrões da máscara para o filme de fotorresiste, como é mostrado nas figuras 2.4 e 2.5.

No caso do sistema de replicação por proximidade a máscara se encontra a uma distância S do filme de fotorresiste. Os raios da fonte luminosa são fortemente colimados para assegurar uma transferência fiel dos padrões da máscara para o substrato, como é mostrado na figura 2.4.

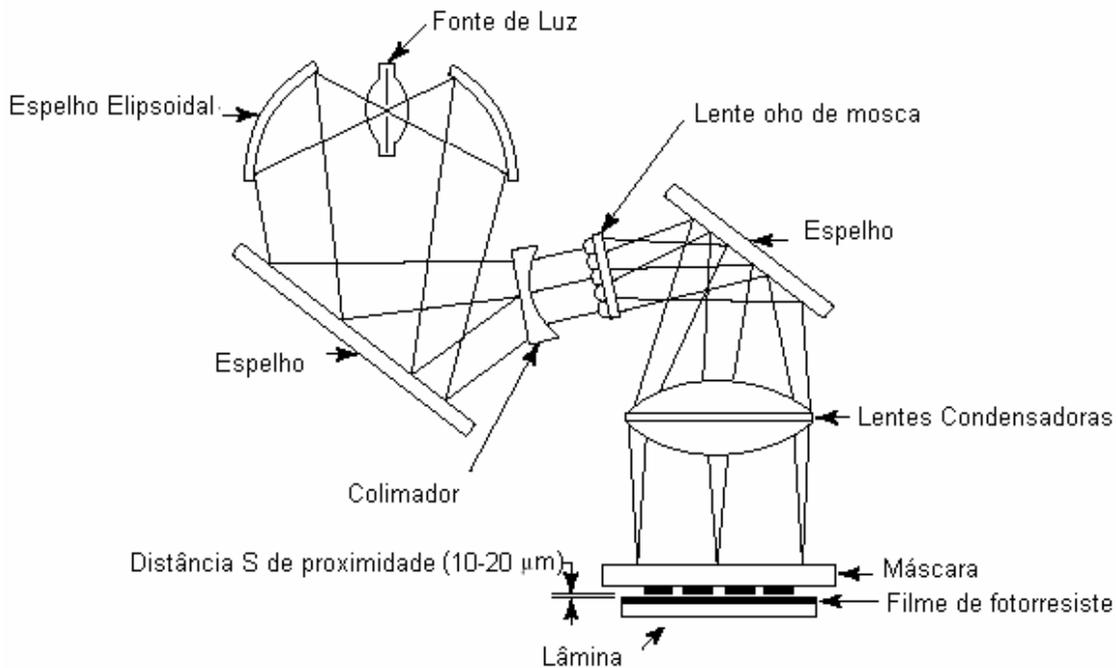


Figura 2.4 Sistema de replicação por proximidade [10]

A grande limitação desse processo é devido à difração da luz ao passar pela máscara, que degrada a imagem projetada no filme de fotorresiste. Este efeito é tanto maior quanto maior o comprimento de onda. No caso do UV, o comprimento de onda pode ser da mesma ordem de grandeza das larguras das linhas fotogravadas

A figura 2.5 apresenta o resultado de uma simulação [16] que mostra a distribuição da intensidade da luz ao passar por uma máscara e os padrões resultantes das exposições em um típico filme de fotorresiste para diferentes distâncias S entre a máscara e o substrato.

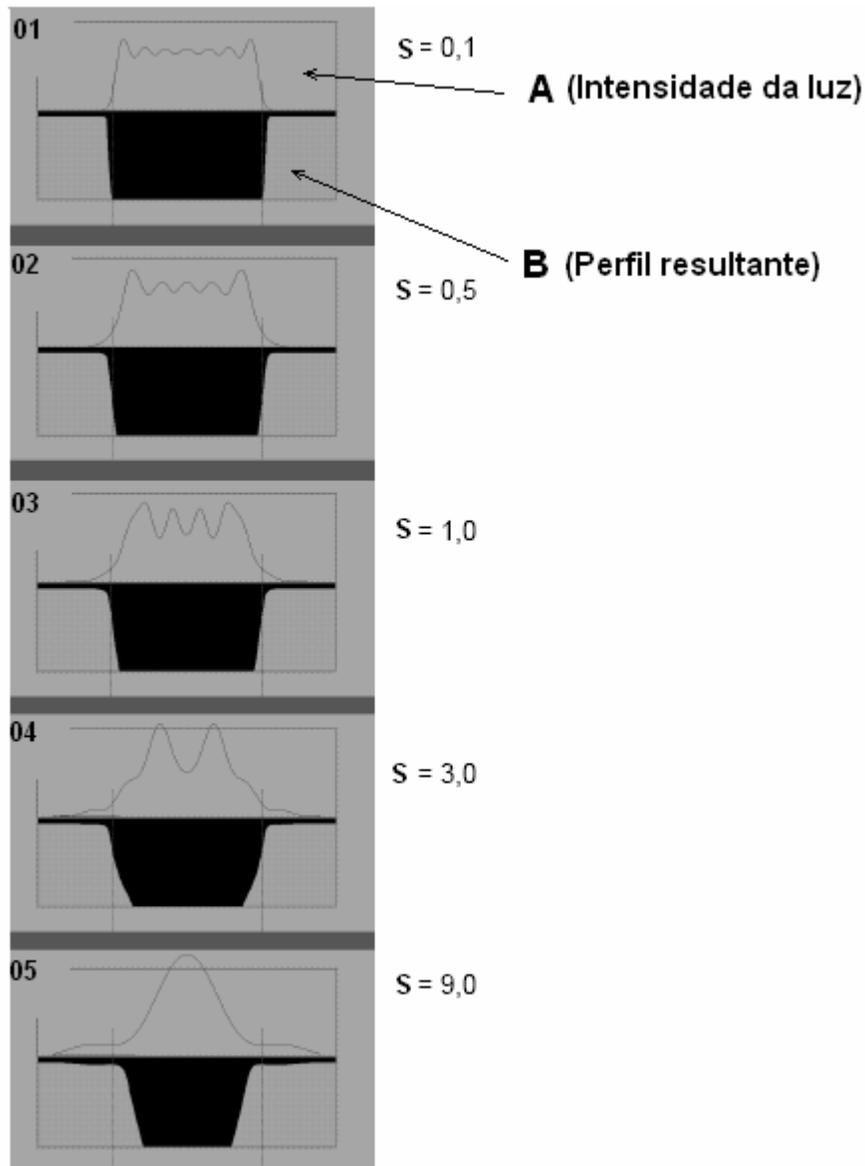


Figura 2.5 Característica do padrão de difração e perfil de fotogração para diferentes distâncias S em μm entre a máscara e o substrato para uma fenda de $2,5\mu\text{m}$ de largura e comprimento de onda da exposição de 334nm [16]

A figura está dividida em quadros e os quadros estão divididos em duas partes. Na parte superior (A) é mostrada a característica da distribuição da intensidade da luz devido ao efeito de difração da luz ao passar pela máscara e na parte inferior (B) é mostrado o perfil resultante da exposição após a revelação do filme de fotorresiste.

Os efeitos da difração podem ser reduzidos com a replicação por contato, com a eliminação do espaço S existente entre a máscara e o substrato como mostrado na figura 2.5. No entanto, a pressão da máscara sobre o substrato durante o processo estraga com o tempo a máscara e pode danificar o substrato, reduzindo o tempo de vida da máscara e introduzindo defeitos devido a não uniformidade do contato durante o processo de exposição,

A figura 2.6 mostra o sistema de exposição por contato.

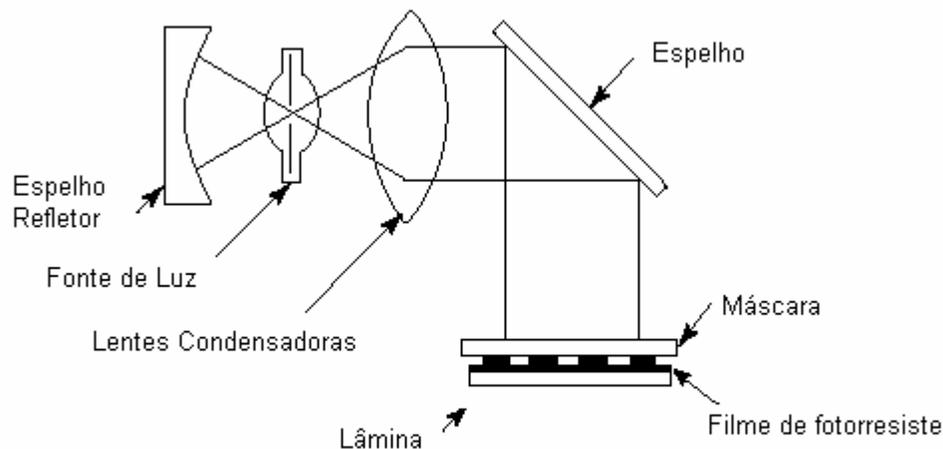


Figura 2.6 Sistema de replicação por contato [10]

Um outro problema ligado a utilização deste método é a máxima área possível de alinhamento (área máxima que permite alinhamento com o próximo nível de fotogração) que depende da dimensão das estruturas fotogravadas e do efeito dos processos térmicos que provocam distorção na lâmina devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica dos filmes existentes no substrato entre os processos de litografia subseqüentes [17].

Entretanto, o método de replicação por contato ainda é largamente utilizado na fabricação de protótipos de circuitos integrados e microssistemas.

A máxima resolução teórica destes processos de replicação, contato e proximidade, é dada pela equação [3,10]:

$$2.b \min = \sqrt{\lambda.(S + d/2)} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde $2b$ é o período de uma rede de linhas paralelas, S é a distância entre o filme de fotorresiste e a máscara, λ é o comprimento de onda da radiação incidente e d a espessura do fotorresiste.

A resolução teórica máxima do sistema é alcançada para $S = 0$.

Resolução

A capacidade de um sistema de reproduzir detalhes de uma imagem é definido como resolução, poder de definição ou definição deste sistema. A resolução é dada pelo número de pares de linhas e espaços de mesma largura que podem ser percebidos como distintos numa dimensão de 1mm. Assim, poder de resolução de 2000 linhas/mm significa capacidade de reproduzir traços de $0,25\mu\text{m}$ de largura [12]. Na prática costuma-se empregar o termo resolução do processo no lugar de definição. Neste sentido, resolução significa a mínima dimensão que se pode obter de acordo com os critérios adotados no processo, ou seja, as menores dimensões que se pode obter no fotorresiste que estejam livres de falhas indesejáveis e que tenham um perfil adequado para a realização do processo subsequente [02].

2.2.2.2 Litografia óptica por projeção.

Os problemas e as limitações dos modos de replicação por contato e por proximidade conduziram ao desenvolvimento de técnicas nas quais a imagem da máscara é projetada no filme de fotorresiste por um conjunto de lentes, com ou

sem redução, como é mostrado na figura 2.7. A projeção é replicada pelo deslocamento da lâmina.

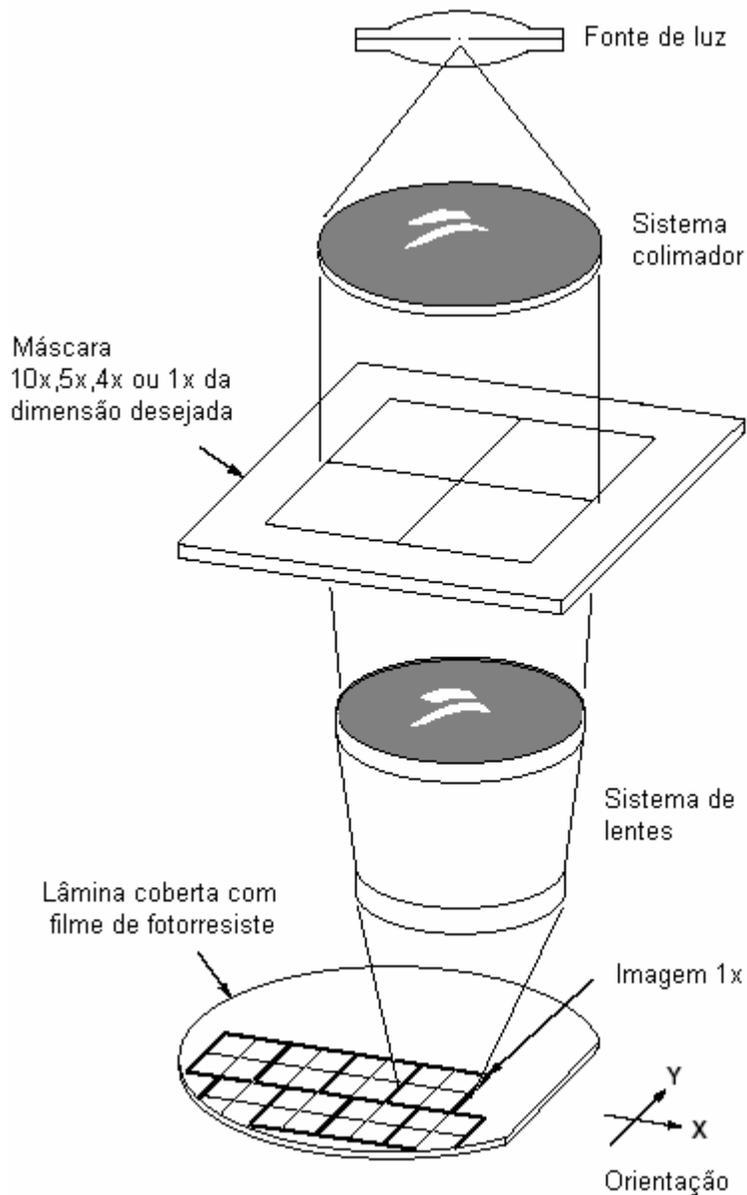


Figura 2.7 Sistema de projeção [10]

Os fotoprojetores (*step and repeat*) permitem a obtenção de uma melhor resolução à custa de um baixo rendimento de produção. O alinhamento durante a repetição pode ser controlado com um sistema interferométrico que reajusta o

alinhamento etapa por etapa, o que permite compensar os erros de distorções da lâmina e aumentar a precisão do alinhamento e de focalização [1].

2.2.2.3 Sistema de replicação por projeção

Formação da imagem

O sistema de lentes de projeção é o elemento mais importante na projeção, Sua função é coletar a luz emitida pela máscara e formar a imagem no filme de fotorresiste. A qualidade óptica do sistema de projeção de imagem é avaliada pela resolução, contraste e tamanho da imagem.

Abertura numérica

A quantidade de luz difratada que pode ser coletada pela lente depende da abertura numérica NA que é definida pelo ângulo máximo de aceitação da lente (α) [01]:

$$NA = n \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Equação 2.2}$$

O n é o índice de refração no plano da imagem, geralmente perto de 1

Uma reconstrução perfeita dos padrões da máscara exigiria coletar toda a luz difratada pela máscara. Então, quanto maior é a abertura numérica da lente melhor é a resolução.

Profundidade de campo

Para se obter os padrões com as mesmas dimensões originais sobre toda a espessura do fotorresiste é preciso que a imagem projetada esteja no plano focal

em toda a espessura da resina. Uma tolerância de desfocalização chamada de profundidade de campo δ é admitida e é definida pelo critério de *Rayleigh*.

Uma diferença de caminho óptico de $\pm \lambda/4$ no plano da imagem não altera a sua qualidade de maneira notável e a profundidade de campo é então definida por [01]:

$$\delta = \lambda / 2.(NA)^2 \quad \text{Equação 2.3}$$

2.2.3 Alinhamento

O alinhamento é uma das características mais importantes de um sistema de exposição.

Com o alinhamento é possível a execução dos vários níveis de fotogração em seus devidos lugares na lâmina, como foi determinado pelo projetista.

O alinhamento é realizado a partir de marcas que são desenhadas nas máscaras pelo projetista das máscaras.

A precisão do alinhamento depende do sistema mecânico de posicionamento da mesa, do projeto das marcas de alinhamento e do sistema utilizado para o reconhecimento das marcas.

A figura 2.7 mostra a seqüência esquemática de máscara utilizadas em um processo de microfabricação com os vários níveis de fotogração envolvidos.

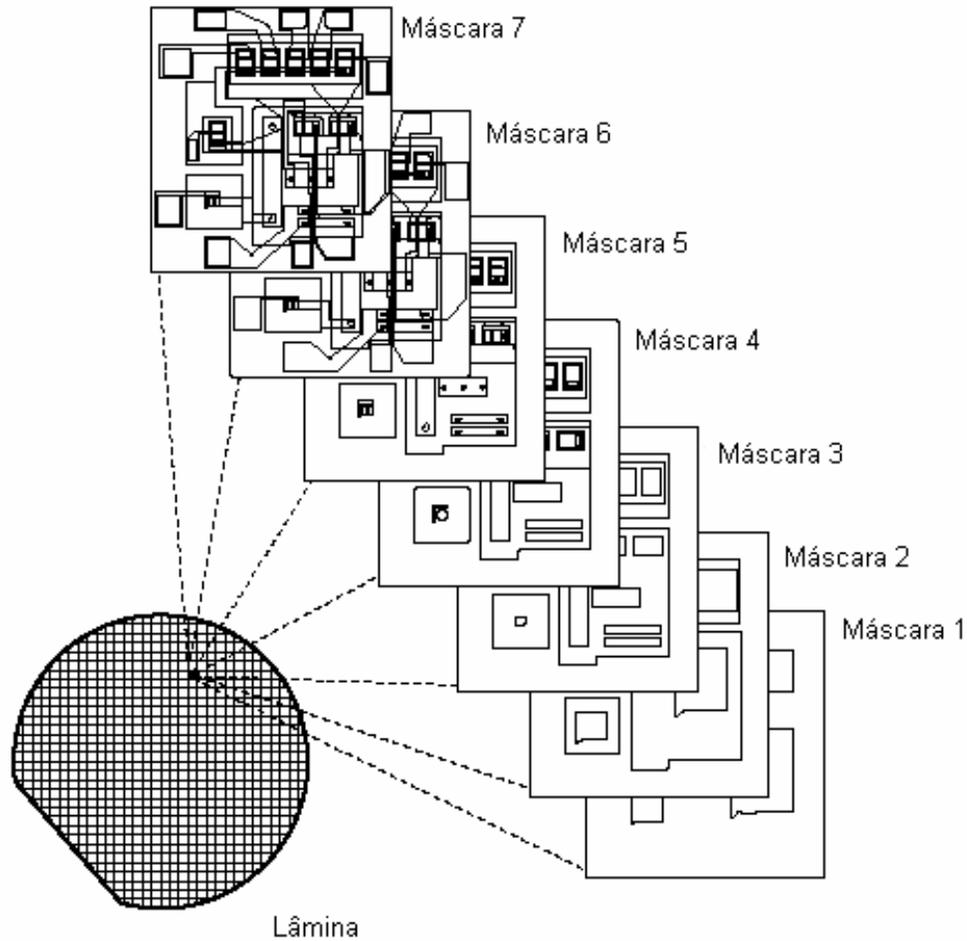


Figura 2.7 Seqüência de máscara utilizadas para fabricação de dispositivos [10]

Infelizmente não é possível utilizar um microscópio óptico para fazer o reconhecimento preciso de estruturas menores que $1\ \mu\text{m}$ e em muitos processos a tolerância no alinhamento entre níveis é menor que $1\ \mu\text{m}$.

As fotoalinhadoras que utilizam microscópio óptico para fazer o alinhamento permitem um alinhamento mecânico da ordem de aproximadamente $0,25\ \mu\text{m}$, contanto que as marcas de alinhamento sejam projetadas para que mesmo com as limitações do microscópio óptico seja possível esta resolução [16].

A figura 2.8 mostra alguns exemplos de marcas de alinhamento.

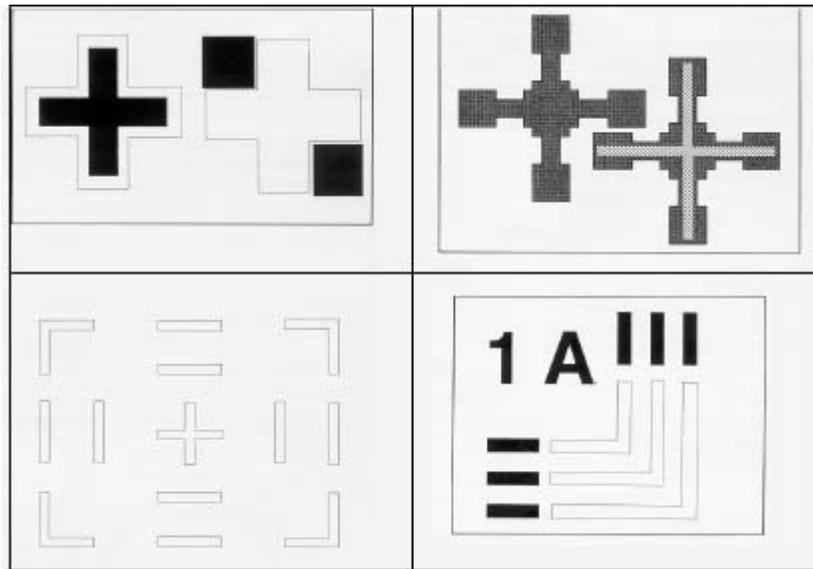


Figura 2.8 Tipos de marca de alinhamento [16]

2.2.4 Fotorresistes

Os fotorresistes foram desenvolvidos primeiramente para a fabricação de dispositivos semicondutores discretos pela técnica planar, sendo posteriormente utilizados na fabricação de circuitos integrados, de pequenas peças metálicas e de microssistemas [12].

As resinas utilizadas como fotorresiste são tradicionalmente polímeros que podem ser de um ou vários componentes. O fotorresiste mais simples é o de um componente como o PMMA (polimetilmetacrilato) utilizado em litografia por feixe de elétrons. Sob a exposição de um feixe de elétron a cadeia do polímero de PMMA sofre cisão que reduz o peso molecular do material. Esta redução no peso molecular faz o PMMA dissolver em ordens de grandeza mais rápido do que o resiste não irradiado em um solvente apropriado, utilizado como revelador [18].

As resinas utilizadas para radiações na faixa de 400-450 nm de comprimento de onda necessitam da adição de um foto sensibilizador já que a energia da radiação não é suficiente para quebrar as ligações C-C da matriz [01].

Os fotorresistes são classificados em positivos e negativos. O fotorresiste positivo é inicialmente um polímero insolúvel na solução utilizada como revelador. Quando exposto se degrada ficando, solúvel na solução reveladora. O fotorresiste negativo é de início solúvel na solução utilizada como revelador e durante a exposição se polimeriza tornando-se insolúvel. Os mecanismos de fotopolimerização e de degradação do polímero dependem do tipo de fotorresiste utilizado.

A maior parte dos fotorresistes utilizados hoje são de múltiplos componentes, variações dos de dois componentes e o *diazonaphthoquinone-novolac*. Este tipo de fotorresiste, positivo, é composto basicamente de dois componentes mais o solvente [18].

- Matriz - Resina Novolac – Polímero
- Sensibilizador - DNQ – inibidor de dissolução
- Solvente orgânico

A resina novolac é a matriz que provê as propriedades físicas requeridas do fotorresiste, serve como suporte básico e estabelece as propriedades mecânicas do fotorresiste. Ela é a responsável pela proteção oferecida pela máscara de fotorresiste durante os processos de corrosão, implantação iônica ou deposição [03].

O DNQ tem uma estrutura molecular que se modifica com a exposição, alterando a taxa de dissolução da resina em ambiente alcalino aquoso.

A figura 2.12 mostra a modificação do inibidor de solubilidade DNQ após a exposição.

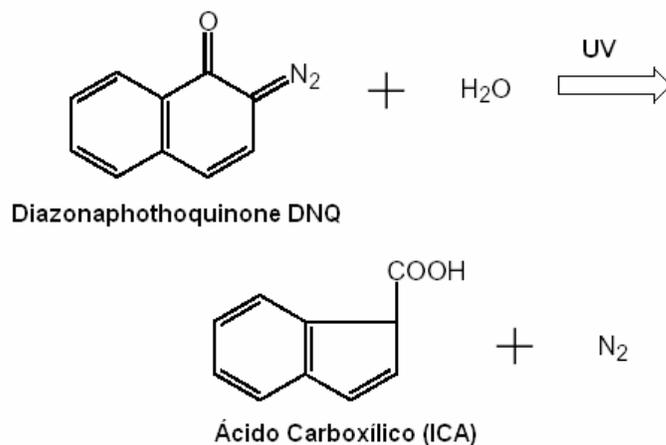


Figura 2.12 – Modificação do DNQ após a exposição [13]

A figura 2.13 mostra esquematicamente a variação da taxa de dissolução da resina para diferentes porcentagem de concentração de DNQ antes e depois de uma mesma exposição em solução de H₂O + NaOH .

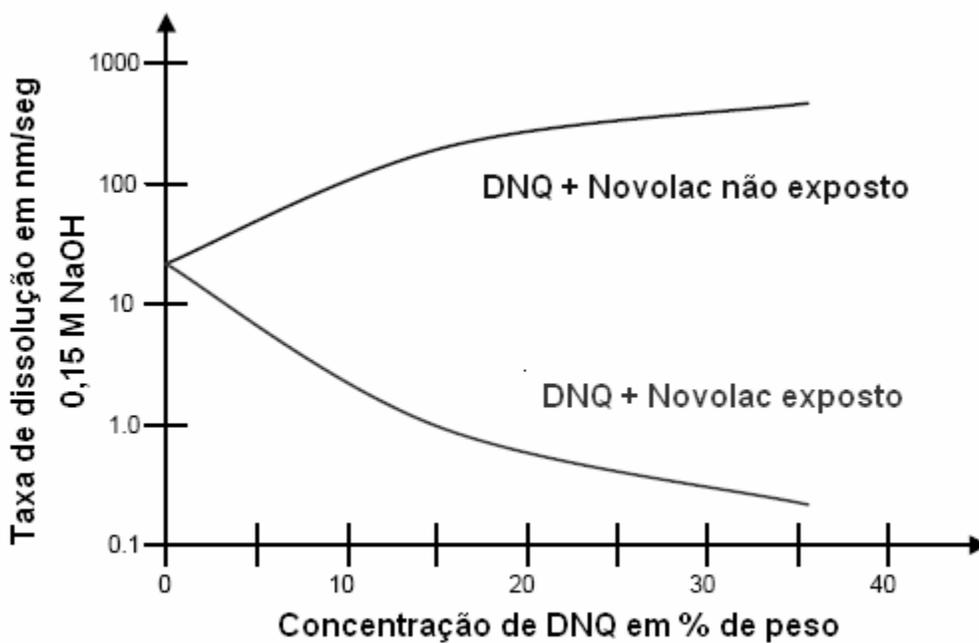
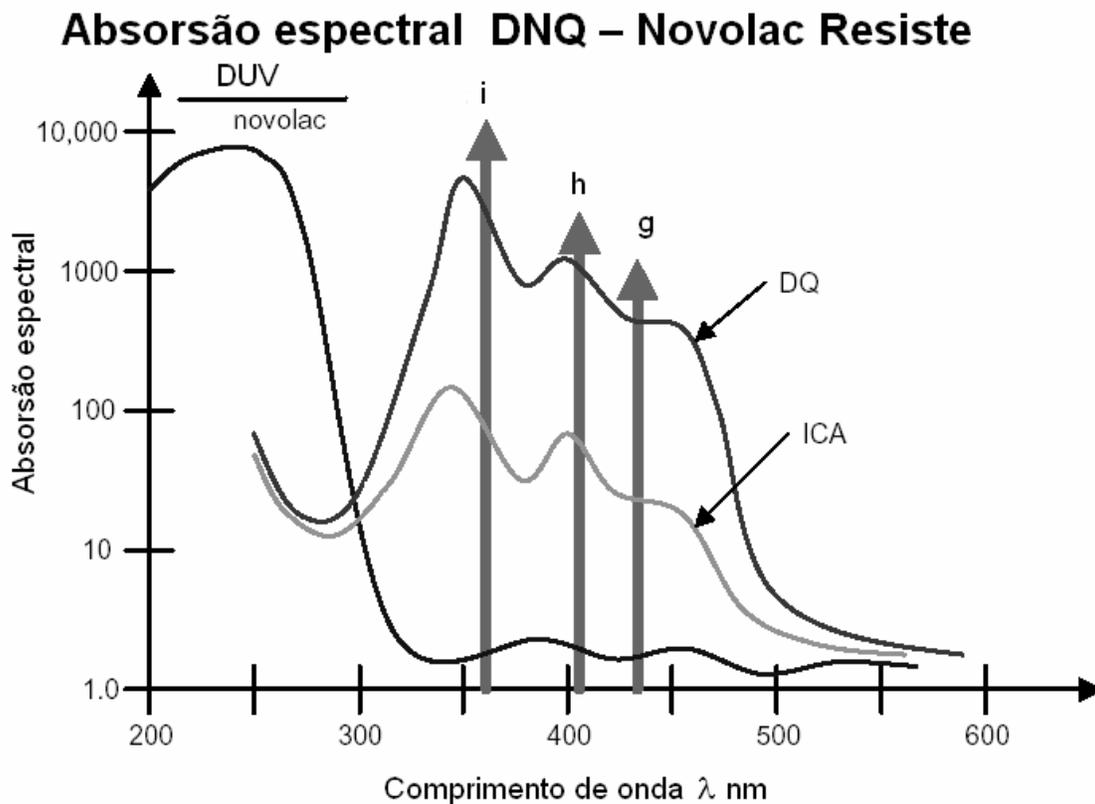


Figura 2.13 – Taxa de dissolução para diferentes concentrações de DNQ [13]

O solvente é utilizado para controlar a viscosidade de modo que a resina seja espalhada formando uma capa de resina uniforme e fina sobre o substrato. A viscosidade da solução pode ser ajustada mudando a relação polímero / solvente o que possibilita a formação de filmes mais finos.

As resinas novolac são solúveis em uma grande variedade de solventes orgânicos, inclusive em acetona, PGMEA e NMP.

Os fotorresistes do tipo *DNQ Novolac* absorvem energia nas faixas espectrais (UV), tendo por isso sido utilizados desde meados da década de 70 [19,2].



**Figura 2.14 –Faixa de absorção dos componentes do fotorresiste DNQ
Novolac [13]**

Infelizmente, os fotorresistes *DNQ Novolac* convencionais não são adequados às necessidades das tecnologias de 0,5 μm ou menores, pois neste caso os comprimentos de onda utilizados na exposição são ultravioleta profundo

(DUV). As características de absorção do polímero novolac nesta região do espectro são muito elevadas, como é mostrado na figura 2.14, fazendo com que apenas a camada de superfície do resiste seja sensibilizada [20,2].

2.2.5 Função Transferência de Modulação

A capacidade de resolução dos projetores ópticos pode ser definida em termos de M.T.F. (*Modulation Transfer Function*), isto é, a medida da fidelidade da transferência de imagem relativa ao contraste. Esta função é definida pela modulação da imagem produzida por uma rede de difração como é mostrado pela equação 2.4.

$$MTF = \frac{M1}{M2} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad \text{Equação 2.4}$$

I_{max} e I_{min} são os valores locais extremos da intensidade luminosa.

A razão I_{max}/I_{min} é chamada de contraste da máscara.

A figura 2.15 mostra a distribuição esquemática de intensidade luminosa para uma rede de difração.

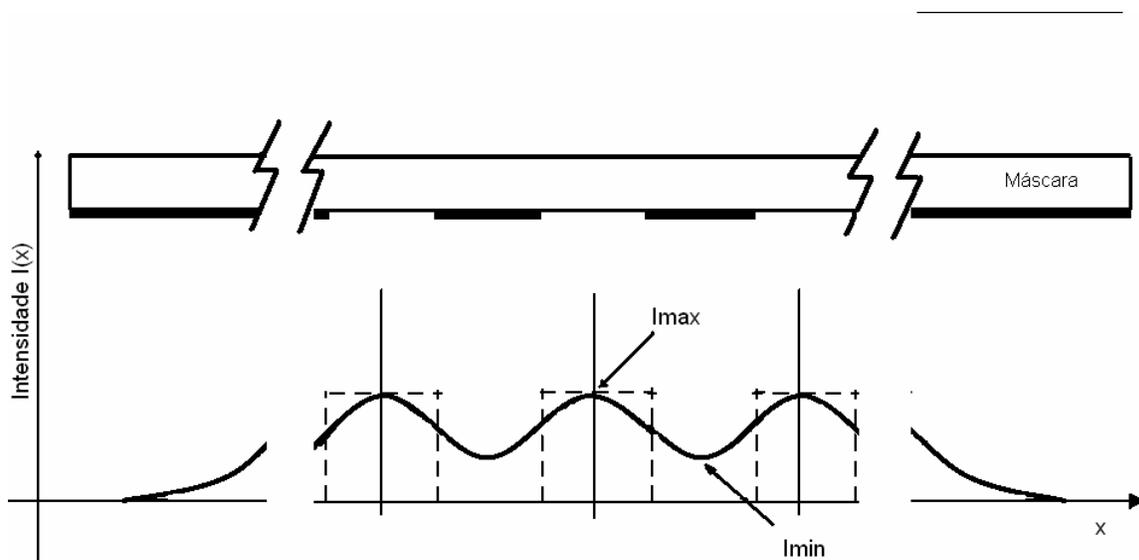


Figura 2.15 – Distribuição esquemática da intensidade luminosa

Para sistemas formados por elementos independentes como máscara, sistema óptico e fotorresiste, o MTF do conjunto é o produto dos MTF individuais. Este procedimento não é aplicado a lentes em cascata, pois as aberrações de uma lente compensam a de outras, portanto não são independentes [21].

O MTF da projeção é uma função da largura de linha, do espaço entre as linhas, da distância S entre a máscara e o substrato, do comprimento de onda da fonte e do fator de qualidade da máscara (contraste da máscara) e comprimento de onda da fonte de radiação.

Uma razão da perda de MTF durante a projeção da imagem no filme vem da refletividade dos padrões absorventes da máscara que provocam espalhamento da luz sobre as partes opacas da máscara [01].

A figura 2.16 mostra esquematicamente o espalhamento da luz em linhas e extremidades da máscara.

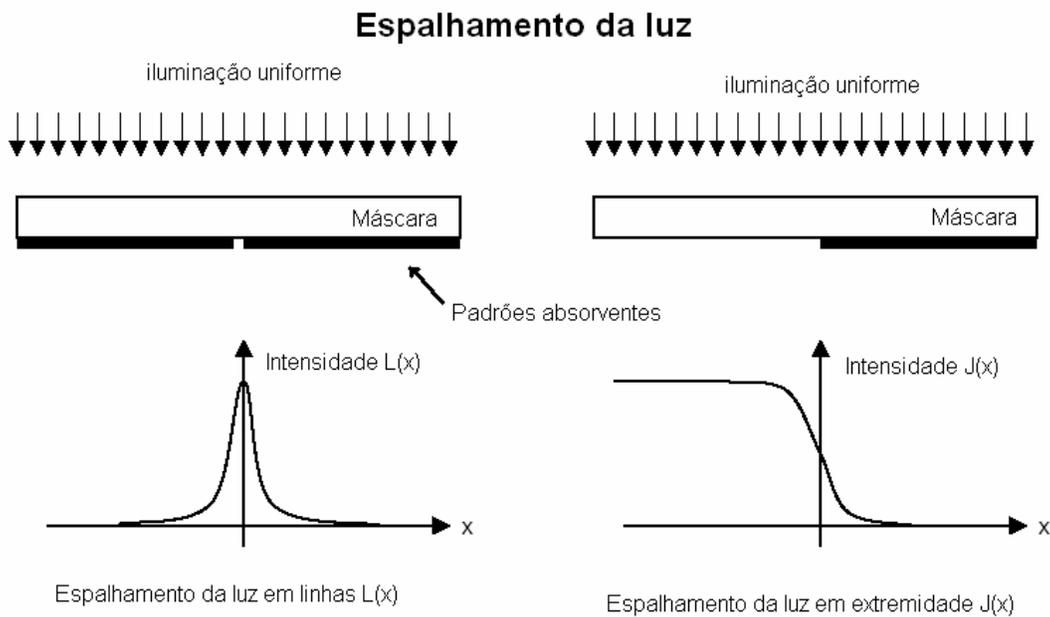


Figura 2.16 – Espalhamento da luz [13]

A figura 2.17 mostra a variação do MTF com a frequência espacial. Podemos observar que devido às propriedades do filme de fotorresiste existe um ganho do MTF do sistema e como consequência temos uma melhor resolução.

$$\text{MTF}(\text{global}) = \text{MTF}(\text{máscara}) \cdot \text{MTF}(\text{sistema óptico}) \cdot \text{MTF}(\text{fotorresiste})$$

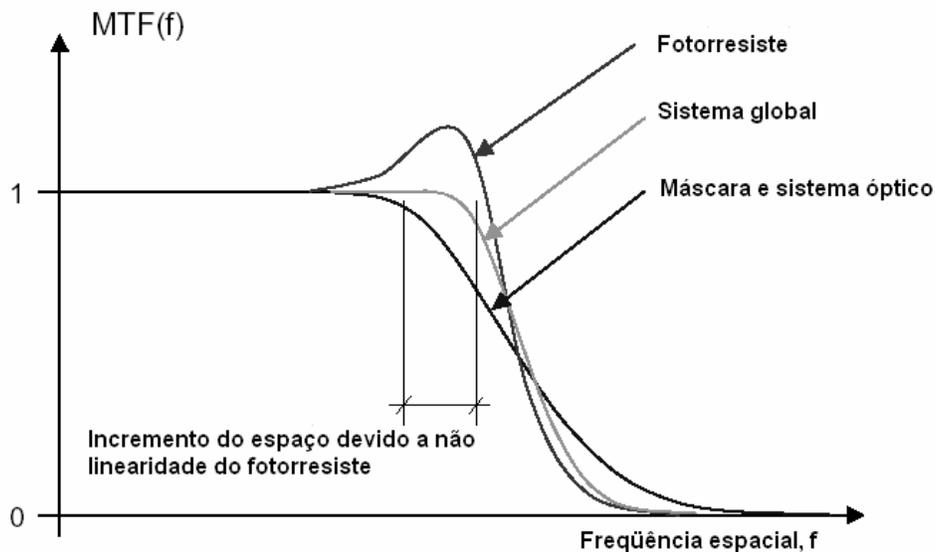


Figura 2.17 – Variação do MTF com a freqüência espacial [13]

A não linearidade da resposta do fotorresiste à exposição corrige distorções introduzidas pelo sistema de projeção (efeito de espalhamento de luz) e é dada pela diferença de absorção de luz do fotorresiste exposto e do fotorresiste não exposto [18].

2.3 Processo de corrosão [01, 08, 09]

A corrosão química do filme não protegido pelo fotorresiste pode ser feita por solução líquida específica, por exemplo, solução de HF para a corrosão de SiO_2 , ou por um plasma com radicais reativos específicos, por exemplo, plasma de CF_4 com H_2 para corroer SiO_2 . No passado, o usual era o uso de soluções líquidas enquanto atualmente usam-se cada vez mais plasmas reativos. Por meio de um plasma consegue-se definir geometrias com dimensões menores e com paredes verticais das janelas, devido à característica anisotrópica da corrosão [09]

A figura 2.16 mostra os passos da transferência de padrões do filme de fotorresiste para um filme de óxido de silício. A figura 2.18.1 mostra a máscara

resultante do processo de fotogração. A figura 2.18.2 mostra o resultado da corrosão do filme de SiO_2 e a figura 2.18.3 mostra o resultado final do processo após a remoção da máscara de fotorresiste.

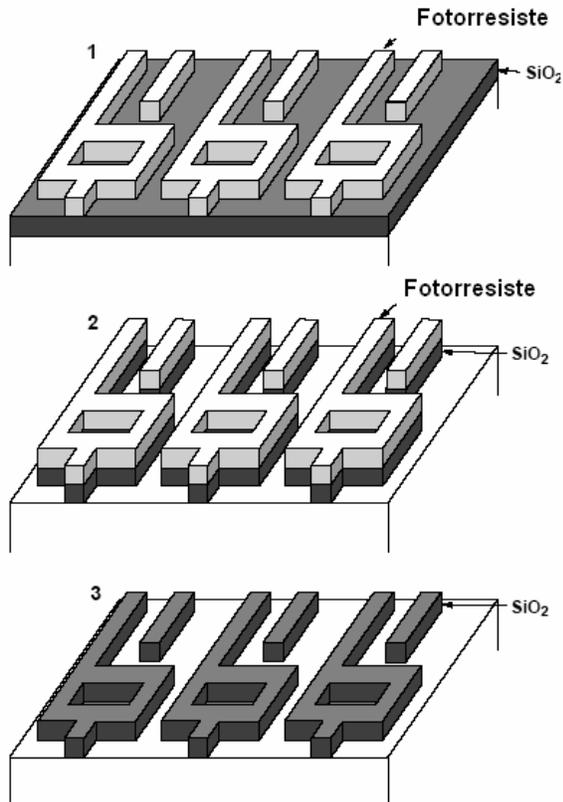


Figura 2.18 Passos do processo de corrosão do filme de SiO_2

2.4 Processo de Metalização por *Lift-off* [01, 14, 22]

Lift-off é um método simples que é muito utilizado na definição de linhas de metal.

Neste processo o metal é evaporado sobre o substrato com fotorresiste revelado, fixando-se sobre as zonas livres de resina e sobre a resina resultante do processo de fotogração. Após a evaporação o metal depositado sobre a resina é removido pela dissolução da resina que o suporta.

No entanto, para o sucesso deste processo são necessárias algumas condições:

O ângulo das paredes verticais dos padrões fotogravados Θ em relação à superfície deve ser maior que o ângulo de evaporação α , isto é, o ângulo com o qual as partículas evaporadas incidem sobre a superfície Θ , como mostrado na figura 2.19. Isto impede que o filme metálico se deposite também nas bordas dos padrões fotogravados formando um filme contínuo que impede a dissolução da resina.

A temperatura do processo de evaporação deve ser compatível com a temperatura vítrea da resina, para impedir a distorção dos padrões durante o processo de evaporação; a resina não deve fluir durante o processo.

As aberturas que vão receber o filme metálico devem estar limpas para assegurar a aderência do metal ao substrato.

A figura 2.19 mostra o perfil característico do filme de fotorresiste após a exposição.

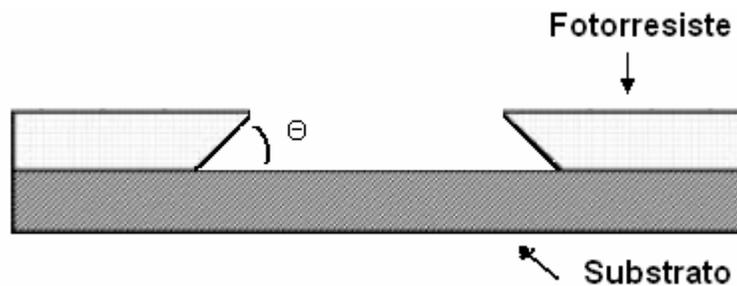


Figura 2.19 Características do perfil do filme de fotorresiste após exposição e revelação utilizado no processo lift-off [14].

A figura 2.20 mostra esquematicamente como o metal se deposita sobre a amostra com o filme de fotorresiste.

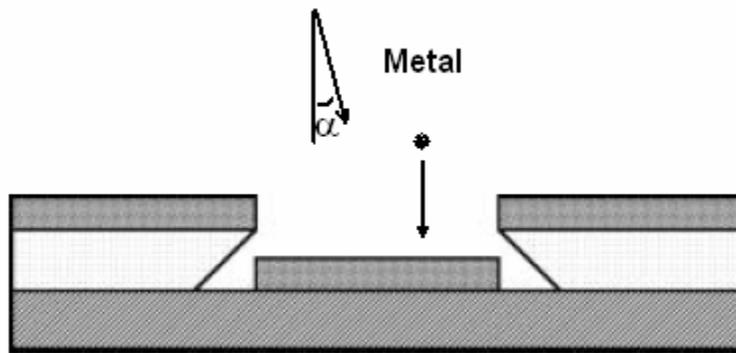


Figura 2.20 Deposição do metal sobre o filme de fotorresiste [14].

A figura 2.21 mostra o resultado final do processo de *lift-off* após a remoção do filme de fotorresiste.

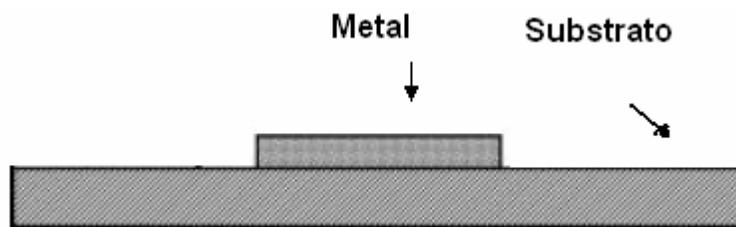


Figura 2.19 Resultado final do processo de *lift-off* [14].

Uma das limitações do processo *lift-off* é que ele não permite a deposição de filmes espessos com grande razão de aspecto, pois as janelas se obstruem facilmente durante o processo de evaporação.

3 Processo de fotolitografia [22]

3.1 Descrição das etapas do processo padrão

A seqüência apresentada na figura 3.1 mostra o fluxograma do processo de fotolitografia utilizado nos processos de corrosão química ou com plasma com radicais reativos.

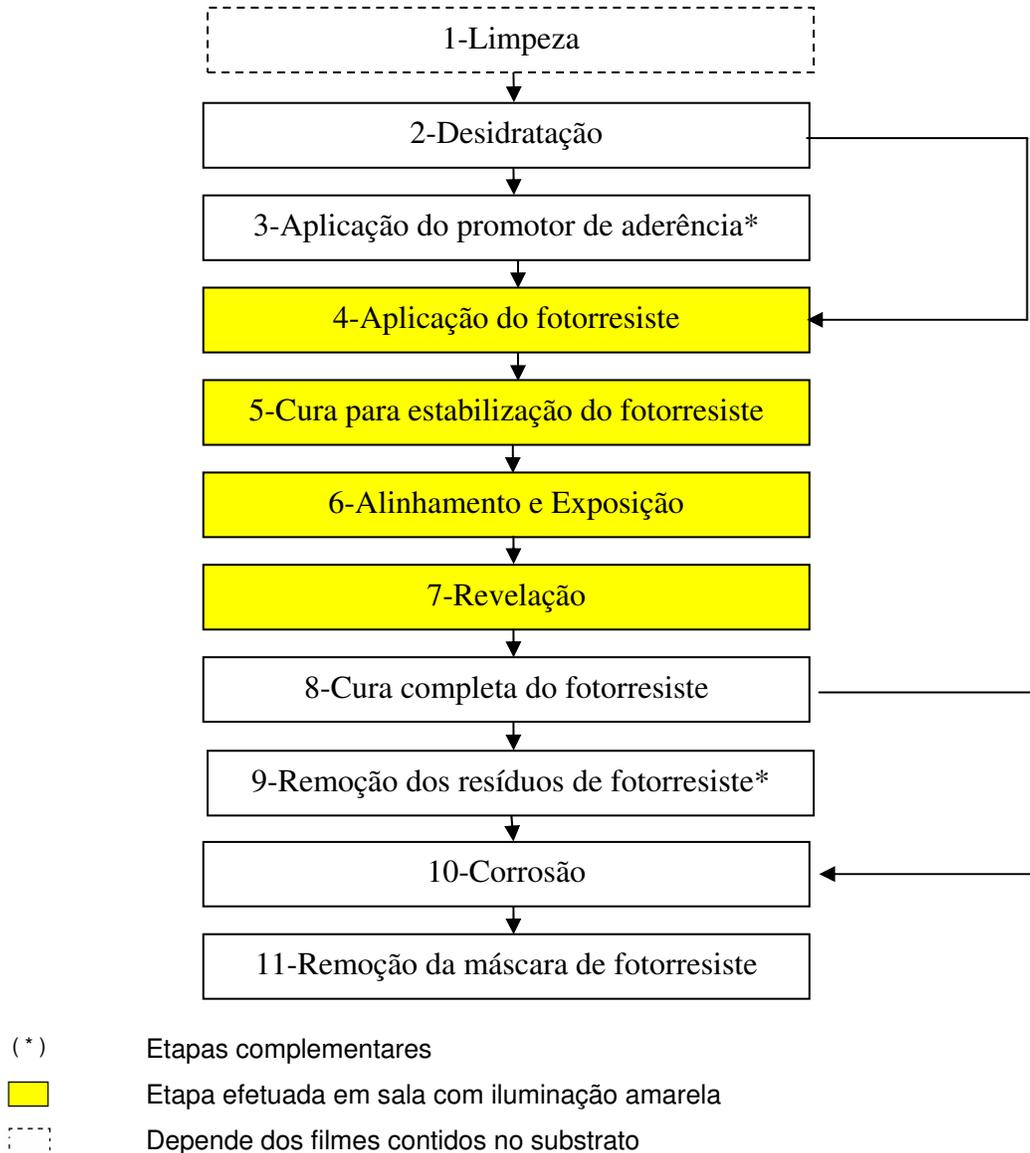


Figura 3.1 Fluxograma do processo de fotolitografia para processo de corrosão

3.1.1 Limpeza [14, 22, 24]

Esta etapa, é realizada ou não, dependente da seqüência do processo de fabricação e as substâncias utilizadas para a limpeza dependem dos filmes presentes na lâmina.

O objetivo é reduzir ao menor número possível os contaminantes possivelmente depositados na lâmina durante o processamento, a manipulação e o transporte.

As principais impurezas removidas são:

- Materiais orgânicos
- partículas

Esta etapa tem influência significativa sobre:

- A aderência do filme de fotorresiste ao substrato;
- Problemas de *undercut* (corrosão do filme sob a máscara de fotorresiste) durante a etapa de corrosão;
- Número de defeitos no filme de fotorresiste depositado;

Os problemas de aderência e *undercut* estão relacionados com materiais orgânicos sobre o substrato e os defeitos no filme com as partículas depositadas sobre a superfície da lâmina.

3.1.2 Desidratação

Após a etapa de limpeza, o substrato deve ser desidratado.

O objetivo desta etapa do processo é reduzir ao máximo possível a umidade da superfície do substrato.

A desidratação da lâmina é feita por evaporação, pelo aquecimento do substrato em uma estufa ou placa quente [14,23].

As variáveis relevantes para o controle do processo de desidratação do substrato são:

- Umidade relativa do ambiente
- Temperatura do ambiente
- Temperatura da placa quente/estufa
- Tempo de desidratação

Esta etapa tem influência significativa sobre:

- A aderência do filme de fotorresiste ao substrato;
- Problemas de *Undercut* durante a etapa de corrosão;

3.1.3 Aplicação do promotor de aderência [14, 22, 24, 26]

Após a etapa de desidratação do substrato é opcional a aplicação do promotor de aderência. Em muitos casos esta etapa é necessária devido às propriedades dos materiais envolvidos no processo de fotogração como fotorresiste ou substrato.

A função do promotor de aderência é impedir que o substrato capture moléculas de água e comprometa a aderência do filme de fotorresiste ao substrato.

A aplicação do promotor de aderência pode ser feita de duas formas; em uma estufa, expondo a lâmina ao vapor da solução contendo o promotor de aderência, ou aplicando diretamente a solução contendo o promotor de aderência em uma centrífuga (*spinner*).

Após a centrifugação a lâmina é colocada em uma placa quente onde são evaporados os resíduos da solução.

As variáveis relevantes da etapa são:

- Umidade relativa
- Temperatura do ambiente
- Temperatura da placa quente/estufa
- Tempo de evaporação

Esta etapa tem influência significativa sobre:

- A aderência do filme de fotorresiste ao substrato;
- Problemas de *Undercut* durante a etapa de corrosão;

3.1.4 Aplicação do fotorresiste [14, 22, 23]

O objetivo desta etapa do processo é a aplicação de um filme uniforme de fotorresiste sobre o substrato, com espessura controlada.

O fotorresiste é colocado sobre o substrato e espalhado por centrifugação em uma centrífuga. A aplicação do fotorresiste utilizando a centrífuga pode ser feita pelos métodos [22,23]:

- Aplicação do fotorresiste no centro ou em toda extensão da lâmina com a mesma em repouso, seguida da centrifugação;
- Aplicação do fotorresiste no centro ou em toda extensão da lâmina com a lâmina em rotação;

A figura 3.2 mostra o processo mais simples de aplicação do fotorresiste utilizando uma centrífuga. Primeiro é colocada uma porção de fotorresiste sobre substrato com um dosador, suficiente para cobertura total do substrato, depois é acionada a centrífuga para distribuir o fotorresiste.

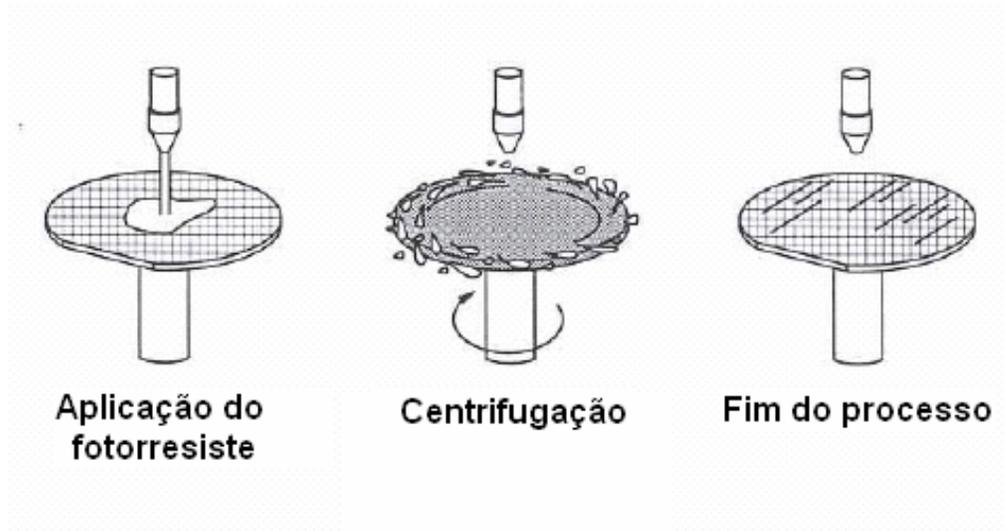


Figura 3.2 Processo de aplicação do fotorresiste [23]

As variáveis relevantes da etapa de aplicação do fotorresiste são:

- Controle do fluxo de ar sobre o substrato
- Umidade relativa do ar
- Temperatura ambiente
- Aceleração da centrífuga
- Velocidade de rotação
- Tempo de centrifugação com velocidade de rotação constante
- Desaceleração

Esta etapa tem influência significativa sobre:

- A aderência do filme de fotorresiste ao substrato;
- Espessura do filme de fotorresiste;
- Uniformidade do filme de fotorresiste;

O fotorresiste do tipo DNQ apresenta alta sensibilidade à umidade. Para obtermos um filme contínuo e uniforme devemos manter a umidade do ambiente

constante entre 20 – 40%, controlar o fluxo de ar, a aceleração da centrífuga, a velocidade de rotação e a desaceleração da centrífuga, e a temperatura [22]. O fluxo de ar sobre o substrato é utilizado para minimizar os efeitos de borda durante o espalhamento do fotorresiste.

3.1.5 Cura para estabilização do fotorresiste (*Softbake*) [14, 22, 25]

O objetivo desta etapa do processo é o aumento da estabilidade e uniformidade do filme.

Nesta etapa é feito o controle do volume de solvente presente no filme promovendo o aumento da adesão e o alívio da tensão mecânica produzida pelo deslizamento centrífugo. Desta forma a estabilidade e a uniformidade é melhorada [22,25].

A etapa, realizada por aquecimento do filme durante um tempo e temperatura determinados, envolve basicamente três passos em série: difusão do solvente para a superfície do filme, evaporação do solvente e o transporte do vapor de solvente [25].

O processo de cura para estabilização do fotorresiste afeta significativamente [22]:

- Contraste
- Velocidade de revelação
- Resolução
- Adesão
- Erosão do fotorresiste não exposto durante a revelação

Existem vários equipamentos que podem ser utilizados nesta etapa. Os mais utilizados são a estufa e a placa quente.

Na estufa o aquecimento ocorre da superfície para o interior do filme, provocando durante o processo o aparecimento de uma camada superficial com baixa concentração de solvente [22].

A placa quente aquece a lâmina e a lâmina aquece o filme; o aquecimento ocorre da interface do filme com a lâmina para a superfície.

Devido à forma de distribuição do solvente, a utilização da placa quente para a realização desta etapa propicia maior aderência do filme ao substrato, que é extremamente importante na etapa de revelação.

Deve-se considerar as diferenças entre as condutividades térmicas e as espessuras dos materiais envolvidos para se estabelecer o tempo de processo quando é utilizada a placa quente.

Para cada um destes equipamentos existe uma distribuição específica de solvente. Pelo controle da distribuição do solvente no filme é possível se obter um perfil mais próximo do vertical dos padrões fotogravados [22].

Dependendo do tempo de cura do fotorresiste para uma determinada temperatura, há uma maior absorção de luz durante a exposição para uma determinada faixa de espectro. Desta forma, podemos dividir a cura para estabilização em duas etapas. A primeira para preservar as propriedades fotoativas do fotorresiste e a segunda para manter a aderência durante a revelação e diminuir os problemas com ondas estacionárias (*standing waves*).

O fenômeno de ondas estacionárias ocorre durante a exposição do filme devido à reflexão da luz na interface fotorresiste / substrato que gera padrões de interferência construtiva e destrutiva, causando a absorção não uniforme de energia ao longo da espessura do filme [02].

Durante a segunda etapa de cura para estabilização ocorre a suavização dos efeitos produzidos pelas ondas estacionárias pela difusão térmica do composto fotoativo [22,27].

A figura 3.2 mostra um perfil de padrões fotogravados onde é possível verificar o efeito das ondas estacionárias.

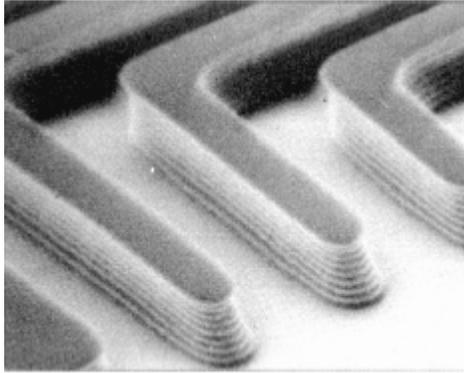


Figura 3.2 Efeito das ondas estacionárias [2]

Na etapa de revelação as regiões com maior concentração de solvente tem um coeficiente de dissolução maior [28]. A combinação da distribuição do solvente e a porcentagem de composto fotoativo sensibilizado durante a exposição são responsáveis pelo perfil da revelação. Conseqüentemente, as variações do tempo e da temperatura desta etapa do processo provocam variação na largura de linha, para um mesmo tempo de exposição e revelação [22].

Temperaturas altas e longos tempos de cura diminuem significativamente a sensibilidade do fotorresiste. [29]

As variáveis relevantes no controle desta etapa são:

- Temperatura
- Tempo

3.1.6 Exposição do fotorresiste [14,16, 22,30]

O objetivo desta etapa é definir as áreas que serão removidas durante o processo de revelação do filme de fotorresiste.

Nesta etapa é utilizada uma fotoalinhadora para fazer o alinhamento e a exposição do filme através de uma máscara.

Durante a exposição o filme sofre modificações químicas. Após a exposição à irradiação UV as seções do filme que não estão protegidos pela

máscara apresentam um aumento de solubilidade em solução reveladora, devido à modificação do inibidor de solubilidade [01,22],

A figura 3.3 mostra o mecanismo fotoquímico do processo de exposição e revelação de um filme de fotorresiste de dois componentes. Como é mostrado, após a exposição o inibidor de solubilidade *DNQ* é transformado em ácido carboxílico, que é um promotor de solubilidade, permitindo remover seletivamente o filme de fotorresiste pela diferença de solubilidade do filme exposto e do filme não exposto [01, 22, 23].

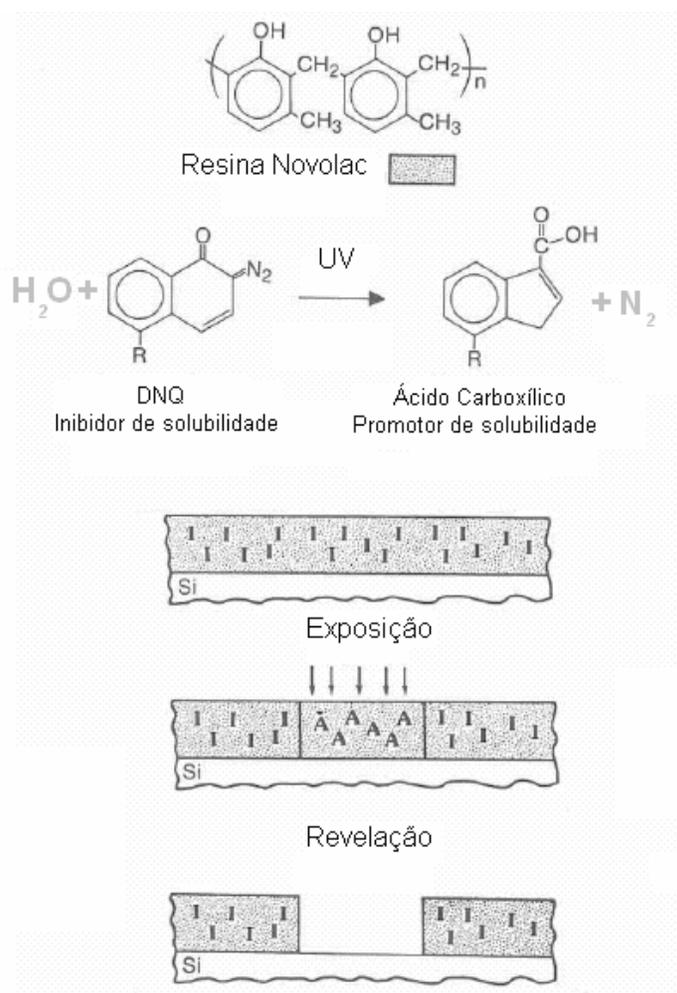


Figura 3.3 Mecanismo fotoquímico do sistema [23]

As variáveis relevantes para o controle desta etapa do processo são:

- Alinhamento
- Intensidade
- Dose de energia

Esta etapa influencia significativamente:

- Resolução
- Qualidade dos padrões fotogravados
- Variação da largura de linha dos padrões fotogravados

O sucesso desta etapa do processo depende basicamente do equipamento de exposição, máscaras (*hardware*) utilizados para a exposição e do processo litográfico empregado.

3.1.7 Revelação [14,16, 22, 30]

O objetivo desta etapa é a remoção do filme de fotorresiste das áreas irradiadas durante o processo de exposição e preservação do filme não exposto [22].

Existem basicamente duas formas de se fazer a revelação do filme de fotorresiste[01, 22]:

- Revelação em meio solvente
- Revelação seca

3.1.7.1 Revelação em meio solvente

A revelação em meio solvente se baseia na aparição de um gradiente de solubilidade entre a área do filme de fotorresiste irradiado e a área não irradiada.

Este gradiente é resultado das modificações da estrutura da resina provocadas pela ação dos raios UV e pode ser devido à diferença de massa molecular, gradiente de reatividade e gradiente de polaridade.

O que limita a resolução na revelação por meio solvente é a falta de aderência do filme de fotorresiste ao substrato e o aumento de volume das estruturas devido à absorção do solvente do revelador.

As variáveis relevantes para o controle desta etapa são:

- Concentração de revelador na solução
- Temperatura da solução reveladora
- Tempo de revelação

3.1.7.2 Revelação seca

A motivação para utilização deste método de revelação é a eliminação dos problemas que limitam a resolução em meio solvente e a possibilidade de se realizar todas as etapas do processo de fotolitografia em vácuo, reduzindo assim os defeitos devido aos problemas de contaminação pelo ambiente.

Existem dois tipos de revelação seca:

- Revelação seca em vapor
- Revelação seca em plasma

A revelação seca feita em vapor permite a eliminação do solvente pois o fotorresiste é despolimerizado sob efeito da radiação e os produtos gasosos formados são eliminados sob vácuo.

A revelação seca em plasma é baseada na diferença da velocidade de ataque do fotorresiste pelas espécies do plasma, das regiões expostas e não expostas à radiação UV. O plasma mais utilizado neste processo é o plasma de oxigênio.

Esta etapa influencia significativamente:

- Resolução
- Qualidade dos padrões fotogravados
- Variação na largura de linha dos padrões fotogravados

Variações no tempo de revelação podem comprometer o processo como, por exemplo, alterar a largura das linhas fotogravadas ou remover o filme de fotorresiste não exposto [22].

3.1.8 Remoção dos resíduos de fotorresiste [22, 23, 31]

O objetivo desta etapa, se necessária, é remover os resíduos de fotorresiste remanescentes da etapa de revelação, que são decorrentes de imperfeições durante a etapa de exposição somados com imperfeições da etapa de revelação.

A etapa é conhecida como descamação (*descum*) e consiste na remoção de uma fina camada de fotorresiste utilizando um plasma de oxigênio, sem atacar o substrato.

Além de promover melhorias nas bordas dos padrões fotogravados, o plasma remove pequenos precipitados de fotorresiste das áreas expostas do substrato que serão atacadas durante o processo de corrosão. Estes precipitados poderiam provocar micromascaramentos durante o processo de corrosão, que resultam em rugosidades no fim do processo.

A realização desta etapa pode ser feita com a utilização de um plasma do tipo *Reactive Ion Etching* (RIE) ou *Barrel*.

As variáveis relevantes para o controle da etapa são.

- Fluxo de Oxigênio
- Pressão
- Potência

- Tempo de processo

3.1.9 Cura completa do fotorresiste (*Hardbake*) [01, 14, 16, 22, 23]

Nesta etapa do processo ocorre a cura completa do fotorresiste, Denominada *thermolysis* do fotorresiste, evapora o solvente remanescente no filme e os produtos voláteis decorrentes da etapa de revelação, promovendo uma melhor aderência do filme de fotorresiste à superfície do substrato e aumentando sua rigidez mecânica.

Em geral a temperatura e o tempo desta etapa é maior que a temperatura de cura para estabilização. No entanto, durante a cura completa, a temperatura da resina deve ser menor que a temperatura de transição vítrea T_g que define a transição do estado vítreo para o estado elástico do filme de fotorresiste.

Como na etapa de cura para estabilização, existem vários equipamentos que podem ser utilizados. Os mais utilizados são a estufa e a placa quente.

As variáveis relevantes para o controle da etapa de cura completa do fotorresiste são:

- Temperatura da placa quente
- Tempo

O processo de cura completa do fotorresiste afeta significativamente:

- A resistência do filme de fotorresiste ao processo de corrosão.
- A remoção da máscara de fotorresiste após a corrosão.

3.1.10 Processamento do substrato [22,27]

Após o término da cura completa temos uma máscara de fotorresiste (delineadora da geometria) sobre o substrato que será processado em uma etapa de corrosão do filme não protegido pela máscara.

As variáveis relevantes desta etapa do processo são:

- Espessura do filme de fotorresiste
- Seletividade entre o filme que será corroído e a máscara de fotorresiste

3.1.11 Remoção do fotorresiste [22, 31]

O objetivo desta etapa é remover a máscara de fotorresiste que foi utilizada durante o processo de corrosão.

A remoção do filme é feita utilizando um solvente apropriado ou plasma de oxigênio. A dificuldade na remoção da máscara está diretamente ligada ao processo à que ela foi submetida e às etapas anteriores de fotolitografia.

4 Experimental

As experiências foram feitas utilizando lâminas de silício com orientação cristalográfica (100) tipo p (dopadas com boro) e n (dopadas com fósforo), com diâmetro de 3 polegadas, que foram limpas utilizando a receita RCA [32,33]. Todos os reagentes utilizados foram de grau de pureza CMOS, e água deionizada de 18 M Ω .cm.

As lâminas foram manuseadas em capela com fluxo laminar de ar classe 100, instaladas em ambiente com temperatura e umidade controlada que foram mantidas durante a maior parte do trabalho em $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(45\pm 5)\%$ respectivamente.

O objetivo do experimento foi encontrar as melhores condições para realização da etapa de fotolitografia dentro do processo de fabricação de circuitos e dispositivos de silício.

4.1 Materiais utilizados

4.1.1 Produtos químicos utilizados nos processos de limpeza

- H_2SO_4
- NH_4OH
- HF
- H_2O_2
- HCl
- Acetona
- Isopropanol

4.1.2 Produtos utilizados no processo de fotogração

Fotorresiste [34,35]

Foi utilizado o fotorresiste AZ5214E que é um típico fotorresiste de três componentes; de matriz (Novolac) e inibidores de solubilidade a base de *diazonaphothoquinone* (DNQ) diluído em solvente do tipo PGMEA, igual à vários outros resistes de dois componentes[28].

O AZ5214E é um produto da AZ Hoechst Celanese com 29% de resina diluída em solvente do tipo PGMA.

Estes fotorresistes são altamente sensíveis à umidade o que faz necessário o preparo do substrato e o controle da umidade e temperatura do ambiente de aplicação[22].

Promotor de adesão

O promotor de aderência utilizado foi o HMDS - (Hexa Metil Di Silana).

O HMDS possui a formula estrutural $(\text{CH}_3)_3\text{Si}(\text{NH})\text{-Si}(\text{CH}_3)_3$. Quando é aplicado sobre a lâmina ocorrem dois tipos de reações: na primeira etapa o HMDS remove a água absorvida na superfície do substrato e na segunda etapa reduz a energia superficial pelas reações com as ligações ativas de hidrogênio [23,24].

Solvente

O solvente utilizado para diluir o fotorresiste e o promotor de aderência foi o Thinner AZ1500 que é um solvente do tipo PGMEA.

O Thinner AZ1500 é um produto da AZ Hoechst Celanese.

Revelador

O revelador utilizado foi o MIF (Metal Ion Free) 312.

Optamos pela utilização deste revelador por não conter íons metálicos e conseqüentemente não gera cargas móveis na amostra.

O Revelador MIF312 é um produto da AZ Hoechst Celanese.

4.1.3 Equipamentos Utilizados para realização do processo

Centrífuga (*Spinner*)

O espalhamento do fotorresiste foi feito em uma centrífuga (Headway Research Inc.), de alta aceleração. Este aparelho tem uma unidade de controle que permite escolher a velocidade angular entre 500 e 10.000 rpm e o tempo de rotação entre 10 e 60 segundos.

O comando de partida da centrífuga é efetuado em um pedal e a parada é automática depois de decorrido o tempo de rotação pré-ajustado. A lâmina é fixada sobre a base rotatória através de um sistema de vácuo que liga e desliga automaticamente no início e no final da rotação.

Fotoalinhadora

A exposição dos filmes de fotorresiste foi realizada pelo método de contato em uma fotoalinhadora Karl Suss MJB3 Standart.

A figura 3 mostra a fotoalinhadora Karl Suss MJB3 Standart do CCS.



Figura 4.1 - Fotoalinhadora Karl Suss MJB3 Standart do CCS

Esta fotoalinhadora tem uma fonte de luz ultravioleta e um sistema óptico–mecânico de precisão que permite resolver linhas de até $1,75\mu\text{m}$ de largura em condições normal de operação. A fonte de luz é constituída de uma lâmpada de vapor de mercúrio de 200 W de potência e comprimento de onda de 405nm, um refletor esférico e lentes de condensação. O feixe luminoso fornece intensidade luminosa aproximadamente constante numa área circular de 4 polegadas.

A figura 4.2 mostra o sistema de exposição óptico da fotoalinhadora Karl Suss MJB3 Standart.

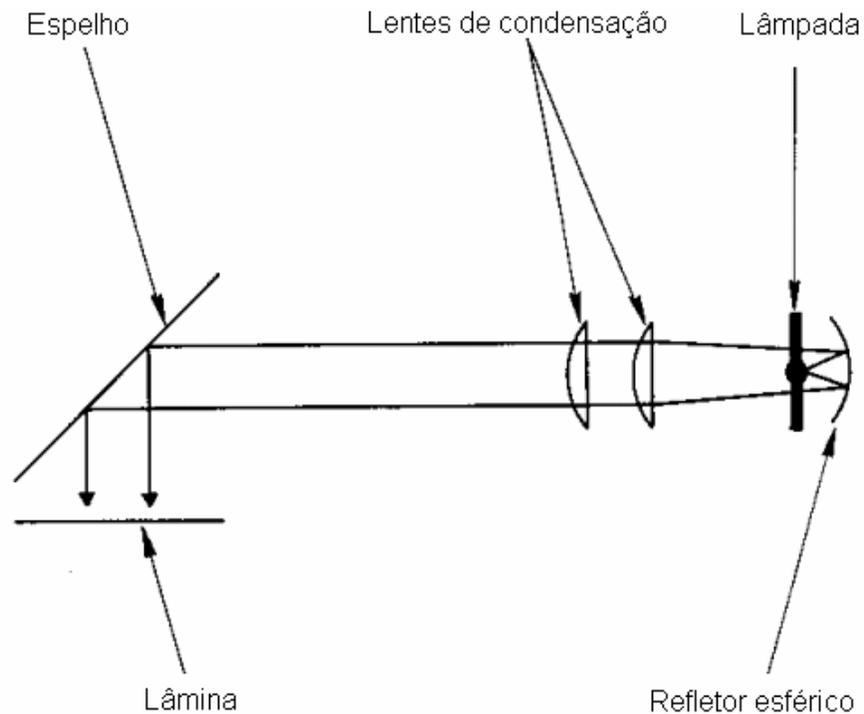


Figura 4.2 - Sistema de exposição óptico Karl Suss MJB3 Standart [36]

O sistema óptico-mecânico permite obter um alinhamento com precisão de até $\pm 0,2\mu\text{m}$. O tempo de exposição é controlado por um obturador automático ajustável em períodos de 0,01s a 99s , em intervalos de 0,01s

Esta fotoalinhadora permite operar no modo (CP), potência controlada e (CI), intensidade controlada.

4.2 Preparação das amostras

A seqüência apresentada na figura 4.3 mostra como foi realizada a preparação das amostras para realização dos experimentos.

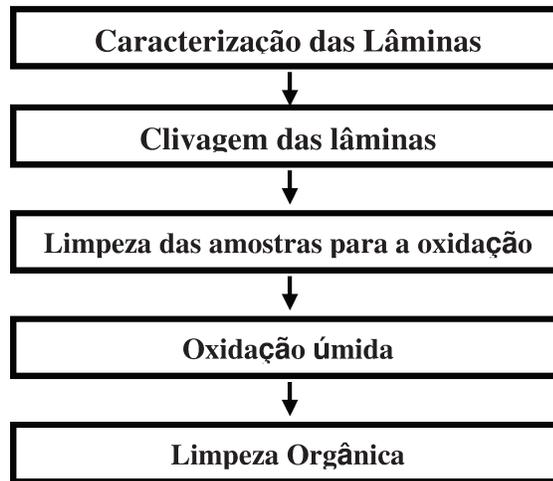
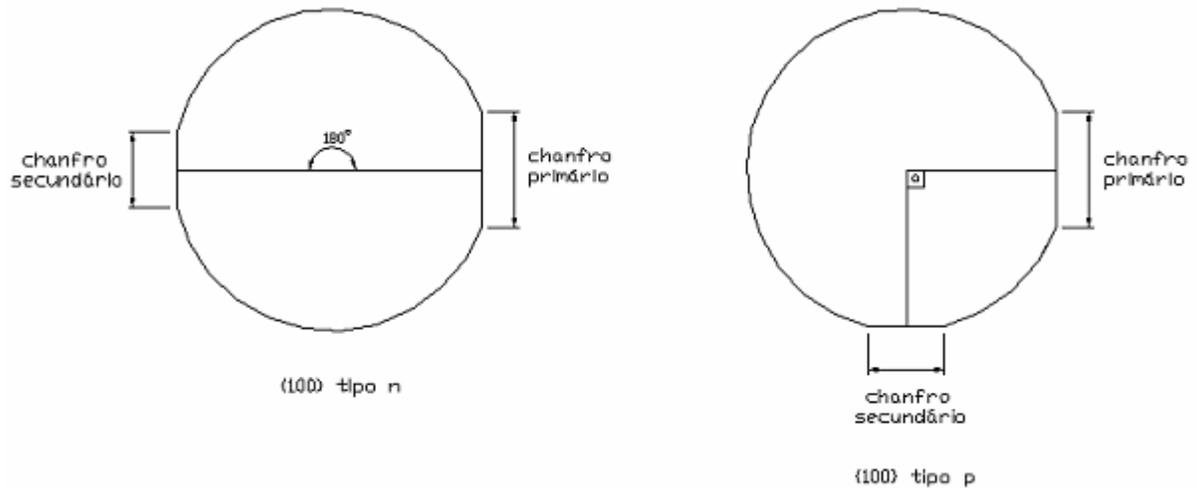


Figura 4.3 Seqüência do processo de preparação das amostras

4.2.1 Caracterização das lâminas

As lâminas foram identificadas conforme a convenção dos chanfros.

A figura 4.4 mostra a disposição dos chanfros para lâminas com orientação cristalográfica (100) tipo p e n .



A figura 4.4 – Disposição dos chanfros para lâminas com orientação cristalográfica (100) tipo p e n

A espessura foi obtida através de um micrômetro.

Lâminas tipo $p \sim 300 \mu\text{m}$ de espessura

Lâminas tipo $n \sim 400 \mu\text{m}$ de espessura

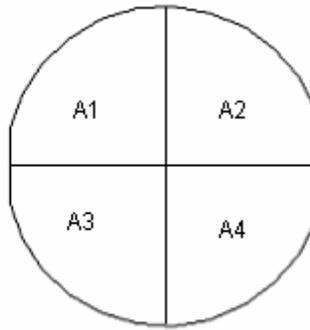
As resistividades foram obtidas através da medida de quatro pontas.

Lâminas tipo $p \sim \rho = 4 \Omega.\text{cm}$

Lâminas tipo $n \sim \rho = 20 \Omega.\text{cm}$

4.2.2 Clivagem das lâminas

As lâminas foram clivadas, antes da oxidação, em 4 partes e identificadas como é mostrado na figura 4.5.



A figura 4.5 – Clivagem das lâminas

4.2.3 Limpeza das lâminas para o processo de oxidação

Para evitarmos a presença de impurezas na interface entre o Si e o SiO_2 e a contaminação dos fornos de oxidação, é realizada uma limpeza padrão RCA completa [08] (Denominação do C.C.S.) das lâminas antes do processo de oxidação.

Esta limpeza é realizada pela a imersão da lâmina, seqüencialmente, nas seguintes soluções:

- $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (4:1) a 80°C por 10 minutos (solução "piranha");
- $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ (1:10) a temperatura ambiente por 10 segundos;
- $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) a 80°C por 10 minutos;
- $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) a 80°C por 10 minutos;

Entre uma solução e outra as lâminas são submetidas a um enxágüe com água deionizada (DI), resistividade de $18 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$, por 3min. A secagem é feita com jato de nitrogênio.

Função das etapas da limpeza:

- $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (4:1) a 80°C por 10 minutos (solução "piranha"): esta etapa tem como função a retirada de resíduos orgânicos grosseiros que podem estar contidas nas lâminas.
- $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ (1:10) a temperatura ambiente por 10 segundos: esta etapa tem como função remover o óxido nativo das lâminas de silício.
- $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) a 80°C por 10 minutos: esta etapa tem como função remover gordura e metais do grupo IB e IIIB (Cu, Ag, Zn, Cd).
- $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) em 80°C por 10 minutos: esta etapa dissolve íons alcalinos e hidróxidos de Fe^{+3} , Al^{+3} e Mg^{+3} .

4.2.4 Oxidação úmida

Esta etapa do processo é realizada para obtermos o filme de óxido de silício onde serão realizadas as fotografações.

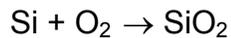
A etapa de oxidação úmida é em um forno térmico a uma temperatura de 1000°C . A seqüência é mostrada na tabela 4.1.

<i>Ambiente do forno</i>	<i>Tempo (min)</i>
N_2	> 3
N_2	30
O_2	10
$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	180
N_2	10
N_2	> 3

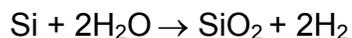
Tabela 4.1 – Etapas do processo de oxidação úmida:

Função das etapas do processo de oxidação úmida:

- $N_2 > 3$ minutos: esta etapa tem como função limpar o ambiente interno do forno e reduzir as tensões.
- N_2 durante 30 minutos: esta etapa tem como função fazer a estabilização térmica das lâminas para o processo de oxidação.
- O_2 durante 10 minutos: esta etapa tem como função fazer o crescimento de uma camada de óxido de melhor qualidade com o objetivo de minimizar defeitos na interface silício óxido de silício. A reação que ocorre é a seguinte:



- $O_2 + H_2O$ durante 180 minutos: esta etapa tem como função fazer o crescimento do óxido de silício a uma taxa maior que a anterior em O_2 .
A reação é:



- N_2 durante 10 minutos: esta etapa tem como função fazer o recozimento do óxido de silício crescido.
- $N_2 > 3$ minutos: esta etapa tem como função fazer a redução do *stress* durante a retirada da lâmina do forno.

A espessura do filme resultante do processo de oxidação úmida foi de ~700nm.

4.2.5 Limpeza orgânica

Para evitarmos problemas de aderência do filme de fotorresiste ao substrato devido à concentração de material orgânico (manipulação das amostras), que pode se depositar durante as etapas anteriores ao processo de aplicação do fotorresiste, fazemos a limpeza orgânica antes do processo de fotogração.

Esta limpeza é realizada com a imersão da lâmina nas seguintes soluções:

- Acetona: temperatura 80°C durante 10 minutos
- Álcool Isopropílico: temperatura 80°C durante 10 minutos

Enxágüe em água DI com resistividade de 18 MΩ.cm, por 3min. A secagem destas lâminas é feita com jato de nitrogênio.

4.3 Obtenção da curva de contraste

Uma maneira de se verificar a influência da temperatura de cura para a estabilização do fotorresiste nas propriedades do filme (sensibilidade e contraste) é pela obtenção da curva de contraste para diferentes temperaturas de cura.

Para constatar possíveis modificações das propriedades do fotorresiste decorrentes de seu armazenamento em diferentes temperaturas, que pode implicar em problemas de repetibilidade, realizamos o levantamento da curva de contraste para um fotorresiste armazenado a 22° C durante 2 semanas e comparamos com um fotorresiste armazenado a 0°C .

Para o fotorresiste armazenado a 22°C, a dose de energia necessária para a total remoção do filme durante a etapa de revelação foi de 100mJ/cm² e para o fotorresiste armazenado a 0°C, a dose de energia necessária para a total remoção foi de 80mJ/cm².

Desta forma constatamos que ocorre uma diferença de sensibilidade do filme de fotorresiste para diferentes temperaturas de armazenagem, o que

compromete o controle de dimensões. Desta forma passamos a utilizar o fotorresiste armazenado a 0°C.

4.3.1 Condições experimentais

1) Desidratação do substrato

Realizado em placa quente.

Temperatura: 118°C

Tempo: 2 minutos

2) Aplicação do fotorresiste

É colocada uma porção de fotorresiste sobre o substrato com um conta-gotas, o suficiente para cobertura total do substrato, e acionada a centrífuga para a sua distribuição.

Rotação: 4000 rpm

Tempo: 40 segundos

3) Cura para estabilização do fotorresiste numa placa quente

Uma maneira de se verificar a influência da temperatura nesta etapa do processo é através do levantamento da curva de contraste para diferentes temperaturas de cura. Desta forma fizemos o levantamento da curva para dois grupos de amostras submetidas a temperaturas de 90°C e 118°C respectivamente.

- Grupo 01

Realizado em placa quente.

Temperatura: 118 °C

Tempo: 2 minutos

- Grupo 02

Realizado em placa quente.

Temperatura: 90°C

Tempo: 2 minutos

4) Exposição do filme de fotorresiste

Nesta etapa utilizamos a fotoalinhadora para fazer o alinhamento e a transferência do padrão da máscara, por contato, para o filme de fotorresiste.

Utilizamos uma máscara dividida em duas partes, campo claro e campo escuro.

A figura 4.6 mostra a máscara que foi utilizada para o levantamento da curva de contraste.

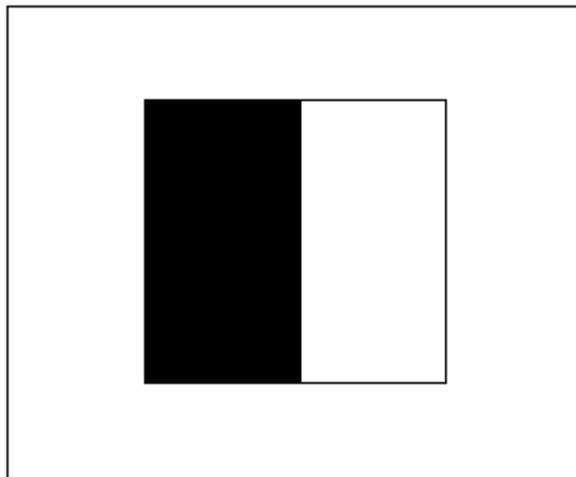


Figura 4.6 –Máscara utilizada para o levantamento da curva de contraste.

Com este tipo de máscara é possível identificar o tempo de revelação a partir de inspeção visual e a espessura do filme exposto não removido após a revelação.

A exposição do filme de fotorresiste à luz ultravioleta foi realizada com intensidade de 8mW/cm^2 com várias doses de energia como é mostrado na figura 5.3 no capítulo 5 pg 65.

5) Revelação do filme de fotorresiste

Para fazermos a revelação, imergimos a lâmina com o filme de fotorresiste exposto em uma solução que contém água e revelador ($\text{H}_2\text{O}/\text{MIF312}$ na proporção 1:1)[08]. Após um tempo estabelecido, a lâmina é mergulhada em água para desacelerar a dissolução da resina e enxaguada em água corrente para remover o revelador remanescente.

O tempo de revelação foi fixado em ~30 segundos.

6) Medida da espessura

Depois de feita a revelação foram efetuadas as medidas de espessura do filme com um interferômetro RUDOLF-FTM na região onde está o fotorresiste exposto.

4.4 Estudo dos efeitos da variação da dose de energia nos padrões fotogravados

Uma maneira de se verificar a influência da dose de energia nos padrões fotogravados é pela curva de variação da largura da janela obtida para diferentes doses de energia de exposição.

4.4.1 Condições experimentais

1) Desidratação do substrato

Realizado em placa quente.

Temperatura: 118°C

Tempo: 2 minutos

2) Aplicação do fotorresiste

O processo de aplicação do fotorresiste é o mesmo do item 4.3.1 pg 52.

Devido à baixa resolução para a espessura resultante da centrifugação a 4000 rpm aumentamos a rotação para 5500 rpm. Assim foi possível obter um filme mais fino e atingir a resolução de aproximadamente $\sim 2\mu\text{m}$.

Rotação: 5500 rpm

Tempo: 40 segundos

3) Cura para estabilização do fotorresiste

Temperatura: 118°C

Tempo: 2 minutos

4) Exposição do filme de fotorresiste

A máscara utilizada tem vários conjuntos de linhas periódicas (linhas e espaçamentos iguais) de diferente dimensões ($10\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$, $0,6\mu\text{m}$). Estas estruturas permitem a avaliação da máxima resolução obtida com o processo e variações de dimensão nas estruturas fotogravadas.

A exposição do filme de fotorresiste à luz ultravioleta foi realizada com intensidade de $8\text{mW}/\text{cm}^2$ com diferentes doses de energia como é mostrado na figura 5.5 no capítulo 5 pg 69.

5)Revelação do filme de fotorresiste

O processo de revelação é o mesmo do item 4.3.1 pg 54.

6)Análise e medida dos padrões fotogravados

Depois de feitas as revelações foram medidas as larguras das janelas abertas no filme de fotorresiste, e analisados os problemas de interferência e aderência.

4.5 Estudo da influência da espessura do filme de fotorresiste no processo de fotogração

Uma maneira de se verificar a influência da espessura do filme de fotorresiste no processo de fotogração é variar a espessura do filme aplicado.

4.5.1 Condições experimentais

Para se obter filmes mais finos optamos pela diluição do fotorresiste, aplicado com a velocidade angular da centrífuga constante a 5500 rpm.

A tentativa de se controlar a espessura com variação da velocidade da centrífuga para viscosidade do fotorresiste constante causou problemas de uniformidade e defeitos do filme aplicado em velocidades maiores que 5500rpm.

O diluente utilizado para reduzir a viscosidade do fotorresiste, propiciando assim filmes mais finos, foi o Thinner AZ1500 da Hoechst.

A espessura dos filmes obtidos para as diferentes proporções de diluição é mostrada na tabela 4.2.

% Fotorresiste	Espessura do filme de fotorresiste em μm
100%	~1,460
75%	~0,700
50%	~0,420

Tabela 4.2 - Espessura do filme de fotorresiste para diferentes concentrações de solvente

Após a diluição o fotorresiste passou a apresentar problemas de aderência notados durante a etapa de revelação. Uma forma de melhorarmos a aderência do filme ao substrato foi aumentar a temperatura e o tempo de desidratação do substrato e utilizar o promotor de aderência.

1) Desidratação do substrato

Realizado em placa quente.

Temperatura: 150°C

Tempo 5 minutos.

2) Aplicação do promotor de aderência

Foram feitos testes com e sem a aplicação do promotor de aderência com o objetivo de verificar a sua influência no processo de fotogração.

Na aplicação do promotor de aderência preparamos uma solução contendo 20% de *hexamethyldisilazane* (HMDS) diluído em um solvente do tipo *Propyleneglycol methyl eter acetate* (PGMA), o Thinner AZ1500 da Hoechst. Uma porção suficiente para cobrir todo o substrato foi aplicada no centro das lâminas desidratadas com um conta-gotas e espalhada por centrifugação com a centrífuga.

Rotação: 5500 rpm

Tempo: 10 segundos.

Após a aplicação a amostra foi colocada em uma placa quente.

Temperatura 150° C

Tempo 5 minutos

3) Aplicação do fotorresiste

O processo de aplicação do fotorresiste é o mesmo do item 4.3.1 pg 52.

Rotação: 5500 rpm

Tempo: 40segundos

4) Cura para estabilização do fotorresiste

Realizado em placa quente.

Temperatura: 118°C

Tempo: 2 minutos.

5) Exposição do filme de fotorresiste

Para a realização desta experiência utilizamos a mesma máscara utilizada no item 4.4.

Devido à influência da dose de energia nos padrões fotogravados, foram feitos testes com várias doses de energia até chegarmos à dose adequada para a espessura do filme de fotorresiste utilizado.

A dose considerada ideal para a realização do processo de transferência de padrões é a dose que permite obter a maior resolução com a mínima variação do comprimento das linhas dos padrões fotogravados

A exposição do filme de fotorresiste à luz ultravioleta foi realizada com intensidade de 8mW/cm^2 por tempos variáveis.

6) Revelação do filme de fotorresiste

O processo de revelação é o mesmo do item 4.3.1 pg 54.

7) Análise e medida dos padrões fotogravados

Mesmo procedimento do experimento anterior; item 4.4.1pg 56.

5 Caracterização do processo

Na caracterização do processo foram feitas medidas da espessura do filme de fotorresiste remanescente após a etapa de exposição com diferentes doses de energia. Com os dados obtidos traçamos a curva de contraste: Espessura remanescente normalizada x dose [mJ/cm^2].

Além disso, foram feitas medidas da largura das linhas para comparar a largura obtida com o valor da largura de linha esperada. Com estes dados é possível verificarmos se os parâmetros utilizados no processo de fotogração, intensidade e dose de energia de exposição, são adequados. Se o erro na largura de linha obtida for maior que 8% em relação ao valor esperado, fazemos um novo ajuste dos parâmetros até que o erro seja menor que 8%. Dependendo da aplicação, o erro permitido pode ser maior ou menor [02].

Definição dos termos [02,36]

- **Dimensão crítica (*critical dimension – CD*)**

É a largura absoluta da menor estrutura que se deseja produzir, linha, espaço ou janela de contato. O processo litográfico deve ter melhor resolução que a dimensão crítica estipulada para fabricação.

- **Uniformidade**

Refere-se a manter as mesmas características dos padrões fotografados como largura de linha e espessura do filme de fotorresiste, em qualquer ponto da amostra.

- **Controle da Dimensão Crítica (CD control) [02]**

É a habilidade em manter-se a dimensão crítica dentro de limites de variação (%) especificados pelo processo, seja em várias regiões de uma lâmina ou de uma lâmina para outra lâmina, independentemente de variações de processo tais como tempo de exposição, posição no campo de exposição, condições de focalização, espessura do fotorresiste, dose de exposição, condições de revelação, etc. O valor de controle da dimensão crítica considerado suficiente para obter-se um controle de processo adequado gira em torno de $\pm 10\%$, sendo que para um processo de produção maduro, utilizando-se resistes de uma camada, considera-se $\pm 12\%$ como adequado enquanto que para um processo de linha piloto empregando novas tecnologias, este valor é de $\pm 8\%$.

- **Acurácia e Tolerância de Registro [02]**

Depois de feita a fotogração e garantido o controle da dimensão crítica, deve-se verificar a sua acurácia de registro, ou seja, se o seu posicionamento absoluto sobre a superfície da lâmina coincide com o desejado.

Circuitos integrados e microssistemas são produzidos camada a camada (nível a nível), sendo que o alinhamento e posicionamento de cada camada em relação a outra é muito importante. Sendo assim, devemos garantir o posicionamento entre níveis, especificando-se uma tolerância de registro entre camadas (interníveis) (*overlay* ou *registration tolerance*). Esta tolerância depende das regras de projeto e muitos projetos necessitam de uma tolerância de registro de no máximo 1/5 da dimensão crítica.

- **Defeitos [02]**

Terminado o processo de fabricação do CI ou microssistema, temos que verificar a existência de defeitos que podem inutilizar algumas áreas da lâmina.

Os defeitos podem ser classificados como defeitos puntiformes aleatórios ou defeitos não aleatórios. Os defeitos não aleatórios estão associados ao processamento em si, tais como resolução e registro inadequados, corrosão

incompleta e deposições não uniformes. Defeitos puntiformes são pequenos ($< 10 \mu\text{m}$) e localizados aleatoriamente. Sua origem normalmente é a contaminação por partículas provenientes da atmosfera ou dos equipamentos e materiais empregados no processamento. Um defeito capaz de inutilizar uma pastilha é chamado de defeito fatal (*killing defect*). Os defeitos maiores que $1/3$ da dimensão crítica são quase sempre são defeitos fatais.

- **Sensibilidade**

A sensibilidade é a capacidade do filme de fotorresiste de suportar modificações em sua estrutura sob ação da irradiação

- **Contraste**

O contraste γ é a capacidade da resina de formar perfis verticais, o que leva a uma boa resolução

- **Dose de energia**

A dose é definida como a energia recebida durante a exposição em cada unidade de área.

$$D = I \cdot \Delta t \quad \text{Equação 5.1}$$

Sendo D a dose de energia em (mJ/cm^2), I a intensidade de potência da fonte em (mW/cm^2) e Δt o tempo de exposição.

- **Erosão escura**

Erosão escura é definida como a porcentagem da espessura do filme de fotorresiste não exposto removido durante a etapa de revelação.

5.1 Equipamentos utilizados

As medidas de espessura do filme foram realizadas em um Interferômetro RUDOLF-FTM [39].

As fotografias foram obtidas através de um microscópio óptico de inspeção Jenatech do CCS e dos microscópios eletrônicos JSM-5410 do Instituto de Física Gleb Wataghin e JSM-5900LV do LME/LNLS – Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

As medidas das dimensões dos padrões fotogravados foram feitas através das fotos com o software SemAfore 4.0.

5.2 Estudo da curva de contraste

A curva de contraste permite determinar a resposta do filme de fotorresiste à exposição, ou seja, a capacidade do filme de fotorresiste de corrigir distorções introduzidas pelo sistema de exposição tais como espalhamento de luz e difração [18].

A figura 5.1 mostra esquematicamente as diferenças do perfil resultante após revelação para um filme de alto contraste e para um filme de baixo contraste.

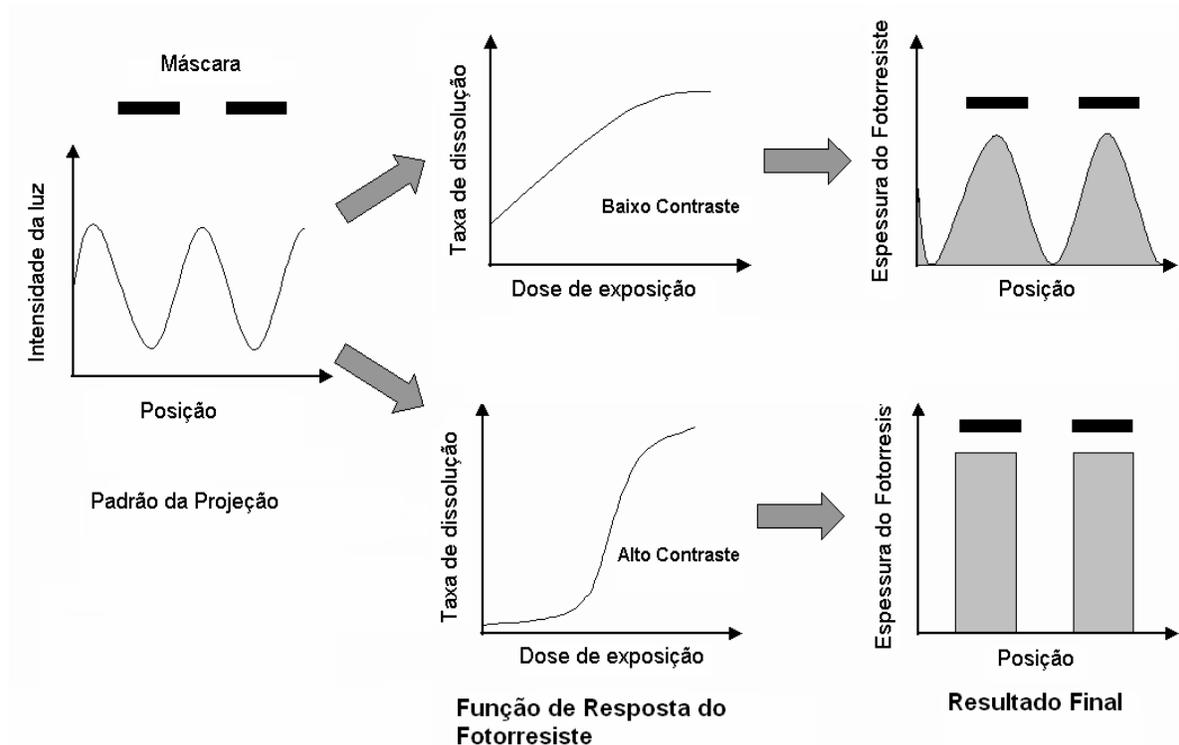


Figura 5.1 – Diferenças do perfil resultante para filmes de baixo e alto contraste [18]

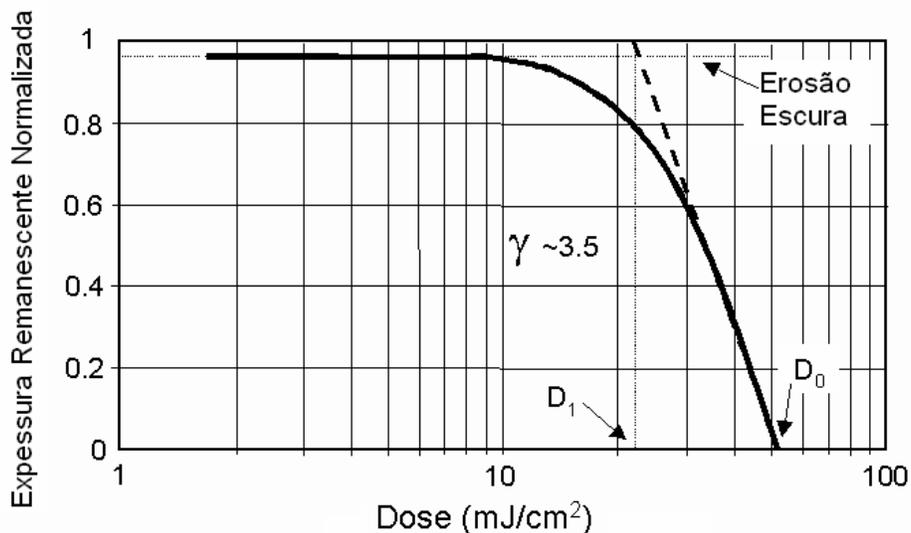
A função de resposta do fotorresiste relaciona a taxa de dissolução do filme de fotorresiste em função da dose de energia aplicada durante a exposição.

Como podemos observar na figura 5.1, quanto maior o contraste melhor a transferência dos padrões para o filme de fotorresiste.

A curva de contraste é obtida com a exposição de várias amostras de um filme a diferentes doses de energia e com um mesmo tempo de revelação. Após a revelação é medida a espessura remanescente do filme, ou seja, a espessura que não foi removida durante o processo de revelação.

Com o estudo da curva de contraste do filme de fotorresiste é possível identificar a sensibilidade do filme, a região de trabalho, o ponto de total sensibilização D_0 , o contraste do filme de fotorresiste e a área de erosão escura para as diferentes condições de processo.

A figura 5.2 mostra o exemplo de uma curva de contraste de um filme de fotorresiste positivo.



**Figura 5.2 - Exemplo de curva de contraste para um fotorresiste positivo
DNQ-Novolac [18]**

A espessura normalizada é calculada a partir do valor da espessura remanescente do filme após a exposição e revelação, dividido pela espessura do filme antes da revelação. O contraste γ é definido como mostra a equação 5.2,

onde D_0 é a energia de exposição necessária para a remoção total do filme de fotorresiste no processo de revelação, e D_1 é o ponto dado pelo cruzamento da prolongação da reta que passa pela espessura remanescente normalizada máxima e a reta que determina a inclinação da curva de contraste (ver figura 5.2) .

$$\gamma' = \frac{1}{\log\left(\frac{D_0}{D_1}\right)} = \frac{1}{\log(D_1) - \log(D_0)} \quad \text{Equação 5.2}$$

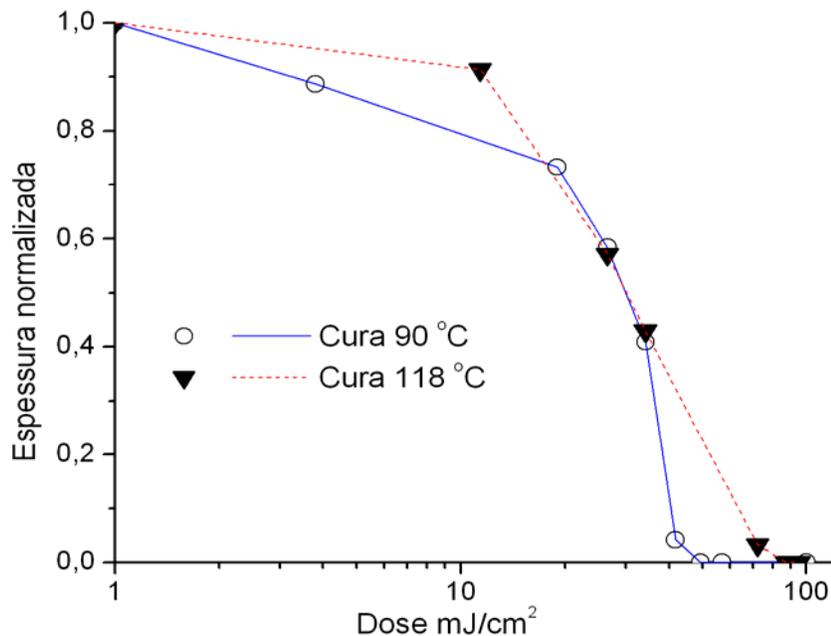
O contraste do filme de fotorresiste se modifica em diferentes temperaturas e tempos de cura para estabilização do filme, pois o coeficiente de solubilidade do filme na solução reveladora depende da quantidade de solvente remanescente e da distribuição da sua mesma no filme de fotorresiste.

5.2.1 Estudo da variação da temperatura de cura para estabilização do fotorresiste.

As condições experimentais utilizadas para a obtenção da curva de contraste foram descritas no capítulo 4.3.1.

A partir da curva de contraste resultante de diferentes processos de cura para estabilização do fotorresiste é possível identificar as características específicas de cada filme; contraste, sensibilidade e erosão escura. No entanto, para a utilização destes filmes para no processo de fotolitografia é necessário que haja aderência do filme fotorresiste ao substrato.

A figura 5.3 mostra o contraste para diferentes temperaturas de cura para estabilização do fotorresiste.



A figura 5.3- Comparação das características da curva de contraste dos filmes de fotorresiste para diferentes temperaturas de cura para estabilização do fotorresiste

No processo de cura realizado a temperatura de 90°C durante 2 minutos observa-se uma maior sensibilidade e um melhor contraste na etapa de revelação. No entanto, o filme resultante deste processo de cura a 90°C durante 2 minutos foi utilizado para transferência de padrões o mesmo apresentou grandes problemas de aderência durante a etapa de revelação para estruturas com largura menor que 5 microns e a área de erosão escura foi maior do que no processo de cura realizado a temperatura de 118°C. Mesmo com modificações no tempo de cura, continuaram os problemas de aderência impossibilitando sua utilização.

No processo de cura realizado a 118°C durante 2 minutos não ocorreram problemas de aderência.

Os problemas de aderência estão provavelmente relacionados a problemas de infra-estrutura do nosso laboratório como controle de umidade e temperatura que estão sendo solucionados.

A tabela 5.1 mostra as principais características do processo realizado nas diferentes temperaturas.

<p>Cura para estabilização do fotorresiste a 90 °C durante 2 minutos</p> <p>Vantagens</p> <p>Maior contraste</p> <p>Maior sensibilidade</p> <p>Desvantagens</p> <p>Menor aderência ao substrato</p> <p>Maior erosão escura</p>	<p>Cura para estabilização do fotorresiste a 118°C durante 2 minutos</p> <p>Vantagens</p> <p>Maior aderência ao substrato</p> <p>Menor erosão escura</p> <p>Desvantagens</p> <p>Menor contraste</p> <p>Menor sensibilidade</p>
--	--

A tabela 5.1 - Características da curva de contraste dos filmes de fotorresiste para temperaturas de 90°C e 118°C

Devido aos problemas de aderência ocorridos na etapa de revelação no processo de cura a 90°C, adotamos o processo de cura para estabilização do fotorresiste a 118°C minutos como padrão.

Para obtermos um melhor resultado desta etapa do processo faremos um estudo visando dividi-la em duas etapas; a primeira antes da exposição ,com menor temperatura para preservar as propriedades ópticas do filme (contraste e sensibilidade) durante a exposição, e a segunda após a exposição com maior temperatura para reduzirmos os problemas durante a etapa de revelação (aderência e erosão escura).

Como pode ser observado na figura 5.3, existe uma mudança de sensibilidade do filme de fotorresiste para diferentes temperaturas de cura para estabilização. Portanto, uma falta de uniformidade nesta etapa do processo, como contato não uniforme da lâmina com a placa quente ou diferença de temperatura

ao longo da placa quente resultará em variações nas dimensões das estruturas fotografadas ao longo da lâmina.

5.3 Estudo da variação da largura de linha com a dose de energia

O estudo da variação da largura de linha a partir da dose de energia da exposição permite encontrar a dose de energia adequada para realizar a transferência dos padrões da máscara para o filme de fotorresiste, dentro da máxima tolerância permitida pelo processo de fabricação do dispositivo.

Uma das principais preocupações na fabricação dos dispositivos semicondutores é o controle da largura de linha mínima ou dimensão crítica CD em circuitos integrados MOS [36].

O desempenho de um circuito integrado é limitado pela velocidade do dispositivo mais lento e a velocidade do dispositivo é inversamente proporcional ao tamanho da porta. Então a CD influencia no desempenho do dispositivo diretamente, e as variações da CD devem ser controladas rigorosamente para assegurar o máximo desempenho dos dispositivos e dos circuitos integrados produzidos com elas [36].

A figura 5.4 mostra esquematicamente a região de trabalho em uma curva de contraste, ou seja, a faixa onde estão às doses de exposição que serão utilizadas para identificar a melhor dose para fazer a transferência de padrões.

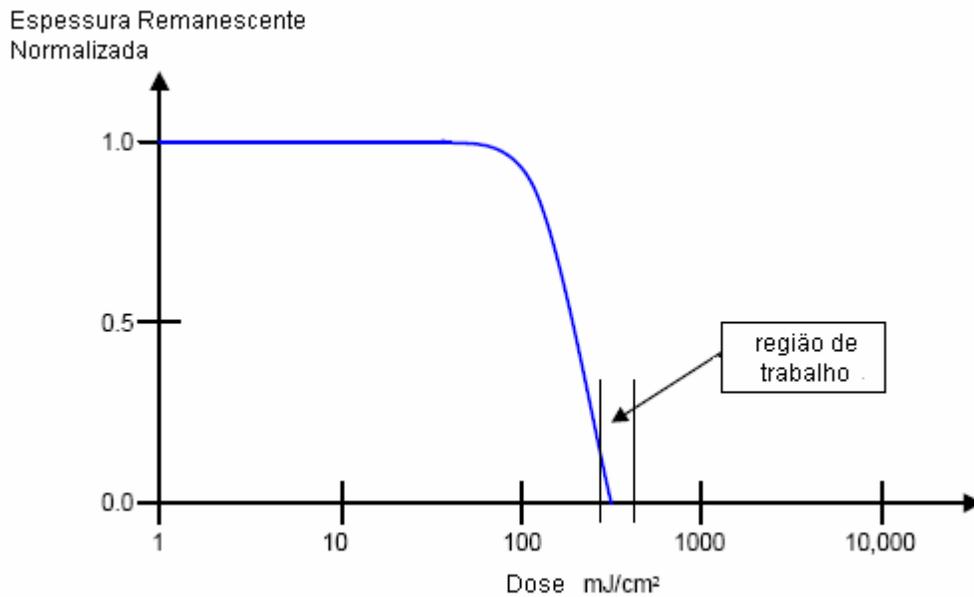
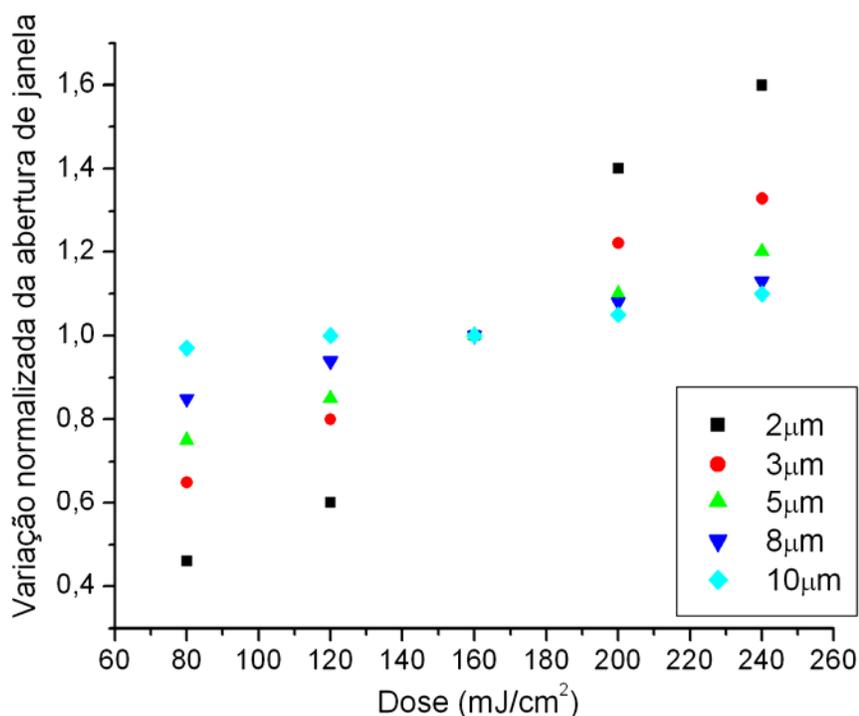


Figura 5.4 - Exemplo da região de trabalho na curva de contraste para um fotorresiste positivo [13]

A dose de exposição utilizada na transferência de padrões nem sempre é igual à dose D_0 , pois ela depende dos efeitos de espalhamento da luz durante a exposição, e da transmitância e densidade óptica da máscara. Assim é necessário ajustar a dose de exposição de acordo com a máscara que está sendo utilizada para que seja satisfeita a condição de tolerância relativa ao erro na largura de linhas que é admitido no processo.

A figura 5.5 mostra a variação normalizada da abertura de janela para diferentes doses de exposição e foi obtido como é mostrado no item 4.4.1.

As doses escolhidas estão em torno da dose de energia necessária para a total remoção do fotorresiste que é encontrada a partir da curva de contraste.



A figura 5.5 - Comparação dos efeitos de variação de largura de janelas para diferentes doses de energia e para diferentes comprimentos de janela fotogravados.

A tabela 5.2 mostra a variação da abertura de janela em função da porcentagem da variação da dose de energia em torno da dose ideal utilizada no processo de fotogração e foi obtida através da análise da figura 5.5.

Abertura janela	Variação na dose de energia		
	±5%	±10%	±15%
2um	± 170nm	±320nm	±480nm
3um	± 135nm	±270nm	±390nm
5um	± 100nm	±200nm	±300nm
8um	± 120nm	±240nm	±400nm
10um	± 100nm	±200nm	±300nm

A tabela 5.2 - Variação da largura das janelas para as diferentes porcentagens de variação nas doses de energia.

Como podemos observar na figura 5.5, doses diferentes da dose ideal, que no caso da figura 5.5 é $160\text{mJ}/\text{cm}^2$, geram variações nas dimensões dos padrões fotogravados. Quanto menor a dimensão dos padrões fotogravados maior a influência das variações das doses de energia na largura dos padrões fotogravados.

Além do controle do tempo de exposição é necessário também o controle da uniformidade da intensidade de potência ao longo da lâmina, pois variações da intensidade ao longo da lâmina resultarão em diferentes doses para cada região da lâmina e como consequência teremos variações diferentes do comprimento de linhas nas diferentes regiões.

5.4 Estudo da espessura do filme de fotorresiste.

Utilizando filmes com espessura de $\sim 1,46\mu\text{m}$, obtidos por centrifugação a 5500rpm durante 40s , foi possível a obtenção de estruturas periódicas repetitivas de $3\mu\text{m}$ de largura e linhas isoladas de até $2\mu\text{m}$.

A figura 5.6 mostra as estruturas periódicas de $3\mu\text{m}$ obtidas com espessura de aproximadamente $\sim 1,46\mu\text{m}$.

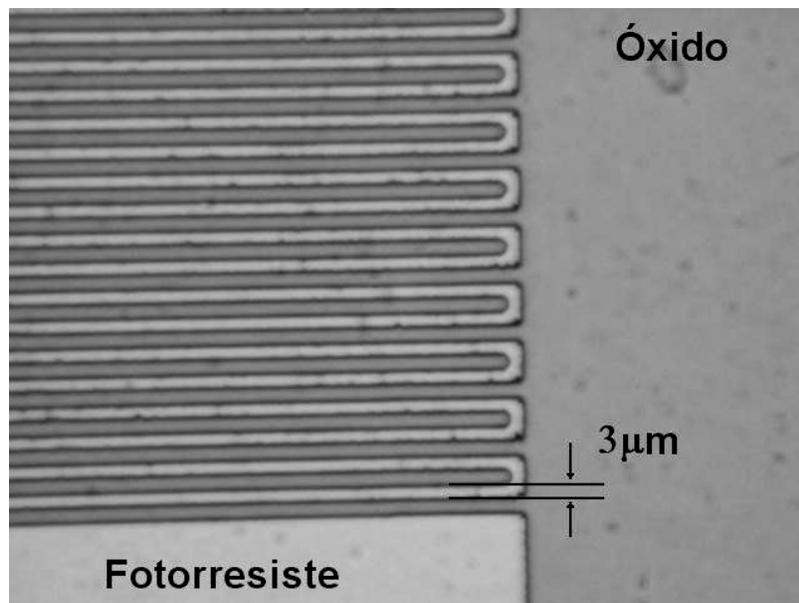


Figura 5.6 –Estruturas periódicas de $3\mu\text{m}$

A figura 5.7 mostra problemas de resolução na fotogração de estruturas periódicas com largura de linha de aproximadamente $2\ \mu\text{m}$ obtidas em um filme de espessura de aproximadamente $\sim 1,46\ \mu\text{m}$.

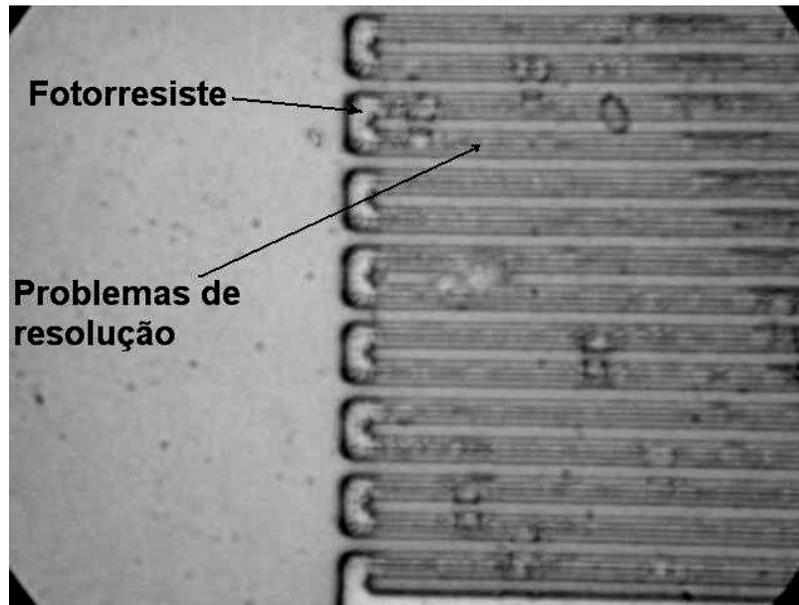


Figura 5.7 – Problemas de resolução para estruturas periódicas de $2\ \mu\text{m}$

Para se obter maior resolução, com o mesmo sistema de exposição, é necessária a utilização de filmes mais finos. Isto é possível com a diluição do fotorresiste em solvente apropriado.

Devemos lembrar que a espessura da máscara de fotorresiste deve ser compatível com o processo subsequente; o fotorresiste deve ter uma espessura suficiente para proteger seletivamente o substrato durante o processo de corrosão.

Com a diluição do fotorresiste obtivemos filmes mais finos, como é mostrado na tabela 4.2 pg 56,

O processo de diluição do fotorresiste foi controlado a partir da relação de volumes entre o fotorresiste solvente e foi repetitivo.

Com os filmes resultantes do processo de diluição do fotorresiste foi possível a fotogração de estruturas de maior resolução.No entanto, os filmes resultantes deste processo apresentaram problemas de adesão ao substrato.

As estruturas que apresentavam maior problema de aderência foram as estruturas de largura menor que $2\mu\text{m}$.

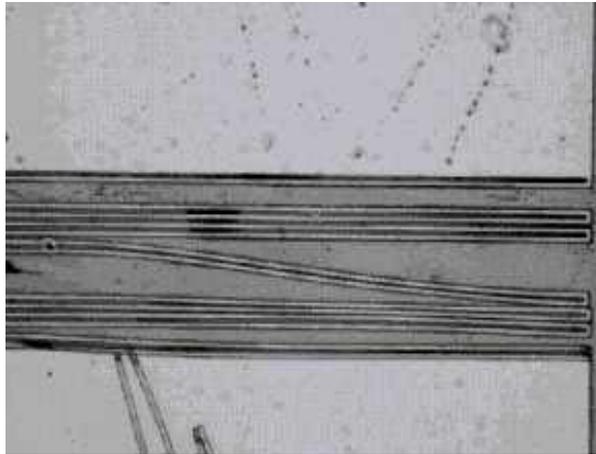


Figura 5.8 – Problema de aderência para estruturas periódicas de $2\mu\text{m}$

Para melhorar a aderência do foi utilizado o promotor de aderência. Com a mudança da desidratação do substrato de 118°C durante 2 minutos em placa quente para 150°C durante 5 minutos, utilização do promotor de aderência e cura para estabilização em 118°C durante 2 minutos, notamos uma grande melhora na aderência das estruturas em geral dos filmes com espessura de 700nm .

Os filmes com espessura de 420 nm apresentaram problemas de adesão ao substrato mesmo após as modificações do processo, o que tornou inviável a sua utilização. Conseqüentemente a melhor resolução foi obtida com o filme de espessura de $\sim 700\text{nm}$, com o qual foi possível a fotogração de estruturas periódicas de até $0,6\mu\text{m}$ como é mostrado na figura 5.9.

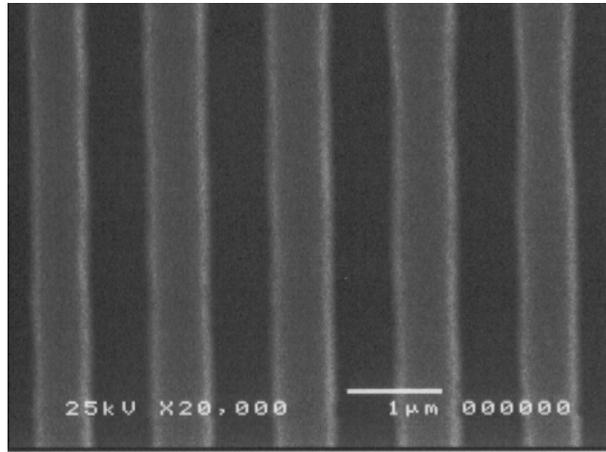


Figura 5.9 –Estruturas periódicas de 0,6 μ m

Apesar de ser possível a transferência de linhas periódicas com largura de $\sim 0,6 \mu\text{m}$ o processo não é repetitivo, ou seja, apenas 1/5 das amostras apresentaram resultados satisfatórios.

O processo mostrou ser repetitivo para fotogração de linhas periódicas com largura de $\sim 2\mu\text{m}$ e linhas isoladas com largura de $\sim 1\mu\text{m}$.

A figura 5.10 mostra a fotogração de linhas periódicas de aproximadamente $2 \mu\text{m}$.

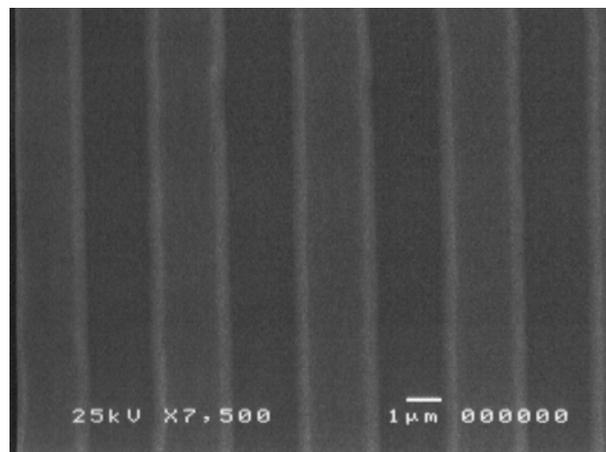


Figura 5.10 –Estruturas periódicas de 2 μ m

5.5 Características das etapas do processo de fotogração

Na caracterização do processo fotolitográfico, as etapas que se mostraram mais críticas foram a desidratação do substrato, a cura para estabilização e a dose de exposição.

5.5.1 Desidratação do substrato

A desidratação mostrou-se de grande importância para a aderência dos padrões fotogravados durante a etapa de revelação. Determinou-se uma temperatura de 150°C durante o tempo de 5 minutos em placa quente, para temperatura ambiente de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade $(45\pm 5)\%$.

5.5.2 Aplicação do promotor de aderência

Devido às oscilações da umidade relativa do ambiente de aplicação do fotorresiste, que pode implicar na falta de aderência dos padrões fotogravados, (para obtenção de estruturas mais finas) deve-se aplicar o promotor de aderência, como é descrito no procedimento experimental.

Obedecendo as condições recomendadas de temperatura e umidade relativa do ambiente de aplicação, não ocorrerão problemas de aderência.

A temperatura recomendada para o nosso processo é de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade $(45\pm 5)\%$.

5.5.3 Aplicação do fotorresiste

A aplicação do fotorresiste a 5500 rpm durante 40 segundos, como é descrita no procedimento experimental, resulta em um filme de aproximadamente 1,46 μm espessura. Esta espessura é suficiente para todos os processos de corrosão por plasma utilizados no CCS na fabricação de dispositivos nMOS e pMOS, tecnologia de 2 μm .

5.5.4 Cura para estabilização do fotorresiste

A partir da avaliação da curva de contraste e do estudo da cura para estabilização do fotorresiste em diferentes temperaturas, tecnologia de 2 μ m, determinamos a temperatura de 118°C durante 2 minutos, como melhor condição.

Em temperaturas maiores que 118° C durante 2 minutos ocorreram problemas na etapa de revelação do filme e em temperaturas abaixo de 90°C ocorreram problemas de aderência do filme ao substrato para estruturas da ordem de 2 μ m de largura.

5.5.5 Exposição do fotorresiste

Esta etapa foi a que mostrou maior relevância no controle das dimensões dos padrões fotogravados.

Quanto menor a dimensão dos padrões fotogravados, menor a tolerância a variações das doses de energia. Desta forma é necessário fazer uma análise das medidas efetuadas após a revelação e, se necessário, fazer o ajuste da dose.

A partir da análise da curva de variação da largura de linha para as diferentes doses de energia, obtém-se a dose de trabalho para o processo utilizado, ou seja, a dose que permite a transferência dos padrões com a mínima variação possível na dimensão dos padrões transferidos.

Para o filme com espessura de aproximadamente 1,46 μ m, com cura de estabilização a 118° C, a melhor dose foi de 160mJ/cm².

5.5.6 Revelação do fotorresiste

Para fazer a calibração da etapa de revelação do filme variamos o tempo de revelação, para várias amostras, o que permitiu determinar o melhor tempo para esta etapa.

A concentração de revelador foi de 1:1 (H₂O MIF312). Soluções com concentrações menores de revelador não removem todo o fotorresiste exposto e concentrações maiores removiam tanto o fotorresiste exposto como o não exposto.

O tempo de revelação ótimo foi de aproximadamente 30 segundos. Tempos maiores implicam na remoção total tanto do filme exposto como do não exposto à luz ultravioleta e tempos menores implicam na abertura parcial da janela.

5.5.7 Cura completa do fotorresiste

Esta etapa foi realizada em uma placa quente a 118° C durante 4 minutos. Com estes parâmetros foi possível a realização de todas as etapas de corrosão por plasma utilizados nos processos nMOS e CMOS.

5.5.8 Remoção dos resíduos de fotorresiste por plasma

A remoção dos resíduos de fotorresiste foi feita utilizando a receita padrão do CCS.

Plasma tipo RIE
Fluxo O₂ 20 sccm
Pressão 50 mT
Potência 30W
Tempo 2 minutos

5.5.9 Processo

Está receita foi utilizada nos processos de fabricação dos dispositivos MOS do CCS para corrosão de filmes de óxido de silício de espessura de 700nm com plasma RIE de SF₆/Ar e filmes de polisilício com espessura de 500nm com plasma RIE de SF₆+CF₄+CH₃. Para ambas as aplicações a máscara de fotorresiste resistiu

ao processo. No entanto é necessário se fazer um estudo mais detalhado da resistência da máscara de fotorresiste ao processo de corrosão por plasma para sabermos exatamente qual o tempo máximo que a mesma pode resistir durante o processo de corrosão.

5.5.10 Remoção do fotorresiste

A remoção do fotorresiste foi feita com acetona fria, seguida por isopropanol frio, acetona quente (70°C a 90°C) seguida por isopropanol quente (70°C a 90°C), o tempo varia de acordo com o processo de corrosão ao qual a amostra foi submetida.

6 Procedimento proposto para o processo de fotogração

6.1 Introdução

A partir dos resultados obtidos na caracterização de cada etapa envolvida no processo, apresentadas no capítulo 5, propõe-se, a seguir um processo de fotogração utilizando os parâmetros ótimos, considerando os equipamentos e materiais disponíveis no Laboratório do CCS/Unicamp.

A tabela 6.1 mostra o processo proposto para filmes de fotorresiste com espessura de aproximadamente 1,46 μm .

Desidratação do substrato	Temperatura: 150°C Tempo: 5 minutos
Aplicação do promotor de aderência	Velocidade: 5500 rpm Tempo: 20 segundos
Aplicação do fotorresiste	Velocidade: 5500 rpm Tempo: 40 segundos
Cura para estabilização do fotorresiste	Temperatura: 118°C Tempo: 2 minutos
Exposição do fotorresiste	Intensidade: 8mJ/cm ² Tempo: 20 segundos
Revelação do fotorresiste	Solução: 1:1 (H ₂ O MIF312) Tempo: ~30 segundos
Cura completa do fotorresiste	Temperatura: 118°C Tempo: 2 minutos
Remoção dos resíduos de fotorresiste por plasma	Plasma tipo RIE Fluxo O ₂ 20 sccm Pressão 50 mT Potência 30W Tempo 2 minutos

Tabela 6.1 – Processo proposto para filmes de fotorresiste com espessura de aproximadamente 1,46 μm

A tabela 6.1 mostra o processo proposto para filmes de fotorresiste com espessura de aproximadamente 700 nm.

Desidratação do substrato	Temperatura: 150°C Tempo: 5 minutos
Aplicação do promotor de aderência	Velocidade: 5500 rpm Tempo: 20 segundos
Aplicação do fotorresiste	Velocidade: 5500 rpm Tempo: 40 segundos
Cura para estabilização do fotorresiste	Temperatura: 118°C Tempo: 2 minutos
Exposição do fotorresiste	Intensidade: 8mJ/cm ² Tempo: 10 segundos
Revelação do fotorresiste	Solução: 1:1 (H ₂ O MIF312) Tempo: ~20 segundos
Cura completa do fotorresiste	Temperatura: 118°C Tempo: 2 minutos
Remoção dos resíduos de fotorresiste por plasma	Plasma tipo RIE Fluxo O ₂ 20 sccm Pressão 50 mT Potência 30W Tempo 2 minutos

Tabela 6.2 – Processo proposto para filmes de fotorresiste com espessura de aproximadamente 700 nm

6.2 Dispositivos fabricados utilizando o processo de caracterização proposto

6.2.1 Com o filme de fotorresiste de espessura de ~1,46µm

O processo de fabricação de dispositivos CMOS empregado no CCS envolve aproximadamente 39 etapas (sem considerar as etapas de limpeza e testes de dispositivos) sendo que 41% das etapas são de definição e transferência de padrões: litografia e corrosão.

A figura 6.1 ilustra a seqüência das etapas de fotogração. Dentre as fotograções realizadas durante o processo a fotogração da porta de polisilício é uma das etapas críticas do processo, porque é nesta etapa do processo que são transferidas as linhas com o menor largura, exigindo assim um maior controle da dimensão das estruturas fotograçadas e maior aderência do filme de fotorresiste.

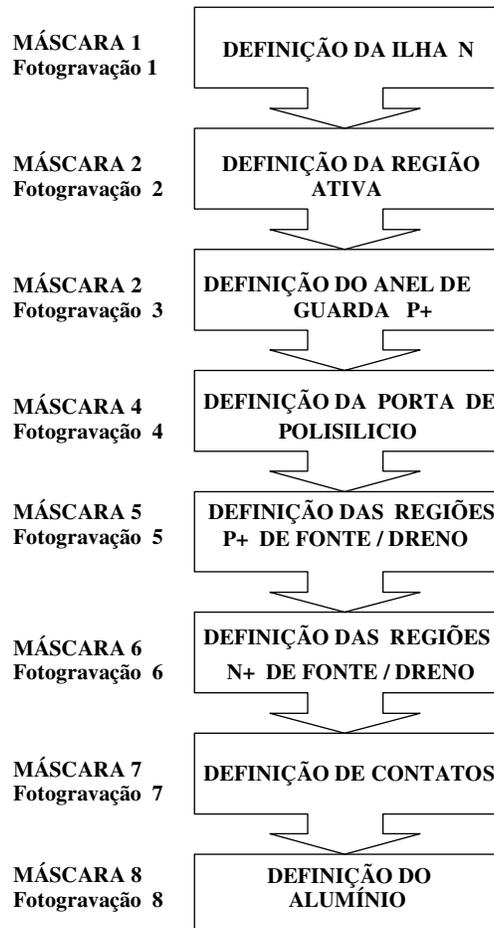


Figura 6.1 - Seqüência das fotograções na seqüência de etapas do processo CMOS[41].

Para determinarmos a mínima largura de linha que se pode fotografar utilizando processo proposto para filme de fotorresiste com espessura de aproximadamente 1,46 μm , utilizamos uma máscara com transistores com largura de porta variadas como é mostrado na figura 6.2. As portas dos transistores têm largura de 20, 10, 8, 5, 3, 2,5, 2,0, 1,5, 1,0 e 0,5 μm .

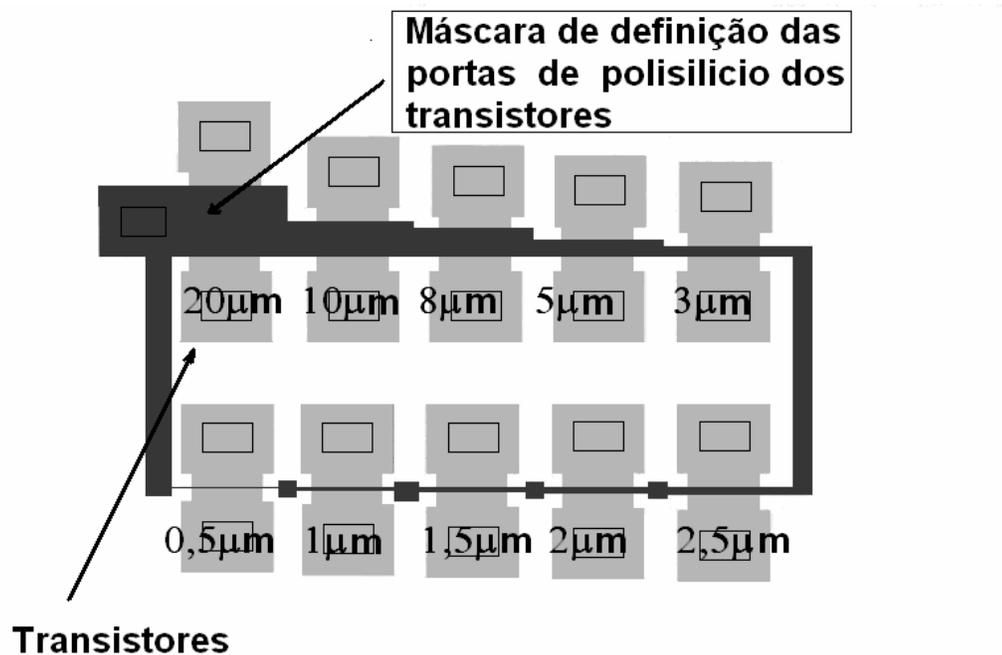


Figura 6.2 - Layout do conjunto de transistores NMOS [41]

Na figura 6.3 é mostrado o resultado da transferência de padrões da máscara para o filme de fotorresiste sobre o filme de polisilício. Como podemos observar, toda a estrutura foi transferida mas as linhas de largura menor que 2µm apresentam problemas de uniformidade, continuidade e aderência .

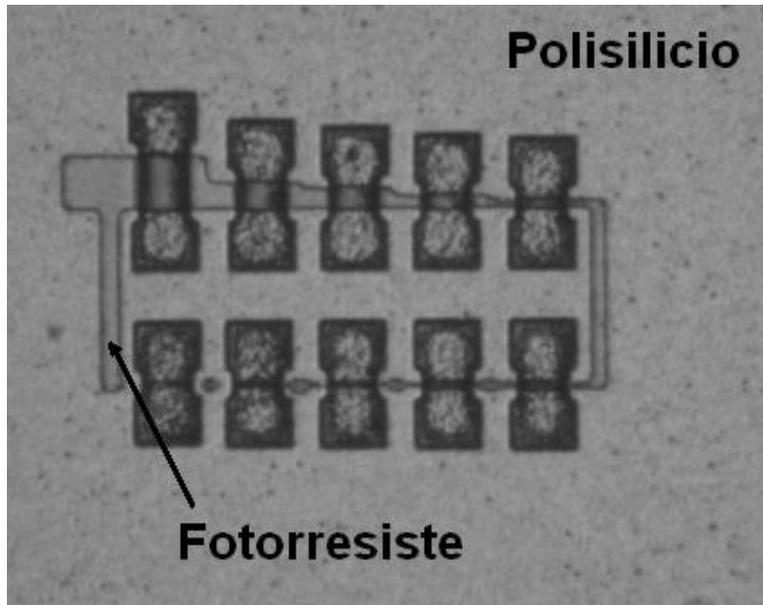


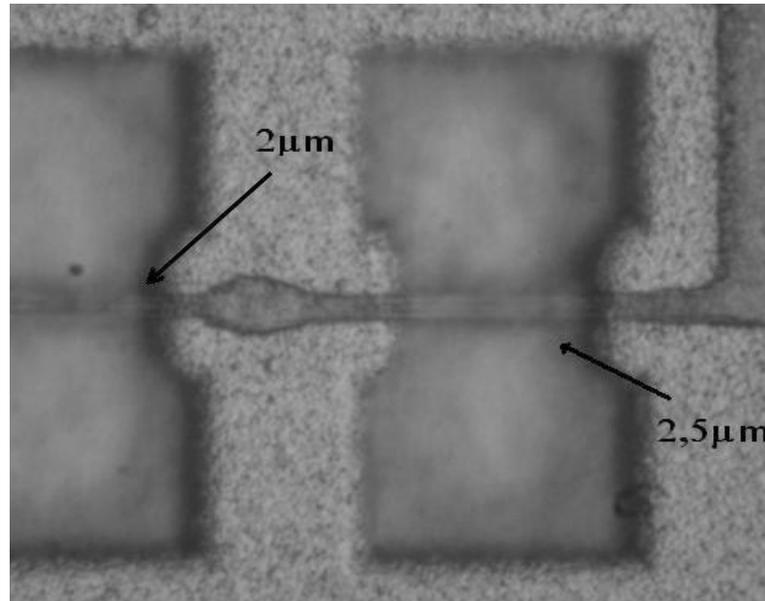
Figura 6.3 – Resultado da fotogração CMOS, canais de 0,5 a 20 μ m

Na figura 6,4 são mostrados os detalhes da fotogração das estruturas menores que 2 μ m. Podemos observar os problemas de uniformidade e aderência.



Figura 6.4 – Problemas de definição para linhas de fotorresiste menores que 2 μ m

Na figura 6.5 é mostrado o resultado da fotogração para linhas de fotorresiste de $2,5\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$. Podemos observar que os padrões fotogravados atendem as necessidades do processo.



**Figura 6.5 –Fotogração para linhas de $2\mu\text{m}$ e $2,5\mu\text{m}$
Tecnologia CMOS $2\mu\text{m}$**

Na seqüência do processo é feita a corrosão do filme de polisilício.

Na remoção do polisilício utilizou-se plasma de $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{CH}_3$ [40].

Após a etapa de corrosão e remoção do fotorresiste é possível avaliar se a máscara de fotorresiste resistiu.

Nas figuras 6.6 e 6.7 é mostrado o resultado da corrosão do filme de polisilício após a remoção do fotorresiste. Pode-se observar que o processo é adequado para fotogração de linhas de até $2\mu\text{m}$.

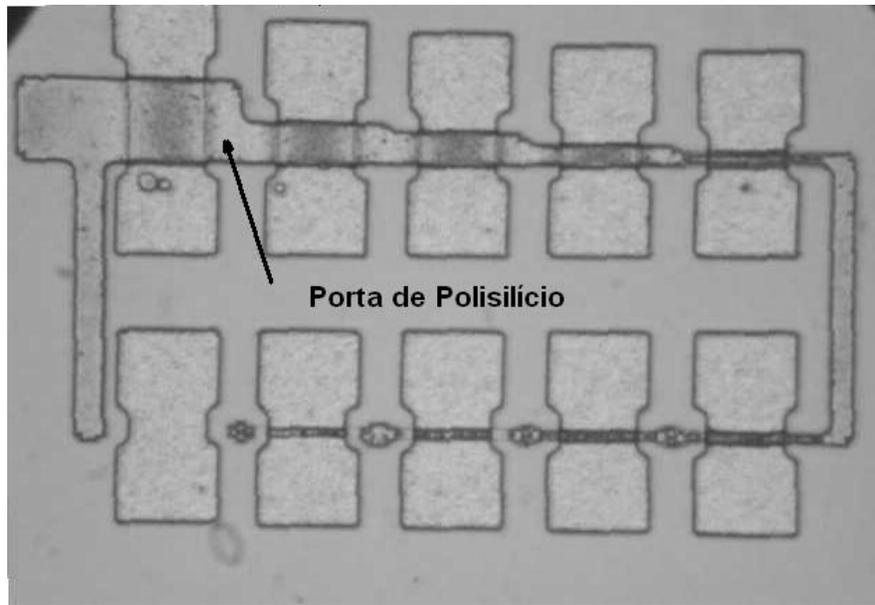


Figura 6.6 – Lâmina na região do conjunto de transistores nMOS após a corrosão do filme de polissilício

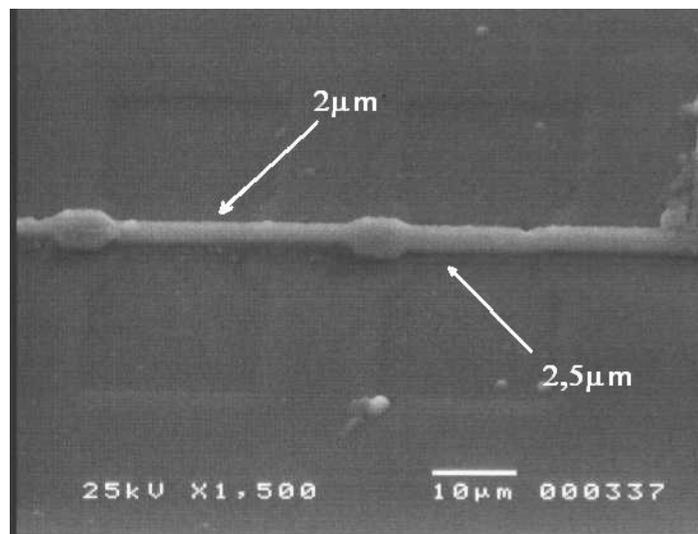


Figura 6.7 – Portas de 2 e 2,5µm dos transistores nMOS após a corrosão do filme de polissilício

6.2.2 Com o filme de fotorresiste de espessura de $\sim 0,7\mu\text{m}$

Para podermos aumentar a resolução utilizamos o fotorresiste diluído.

Este filme foi aplicado em uma das etapas da fabricação dos dispositivos nMOS do CCS e na fabricação de um gerador de campo elétrico.

Assim como o processo de fabricação dos dispositivos CMOS mostrado no item 6.31, a fabricação dos dispositivos nMOS é composta de várias etapas.

A figura 6.8 mostra a seqüência das etapas de fotogração.

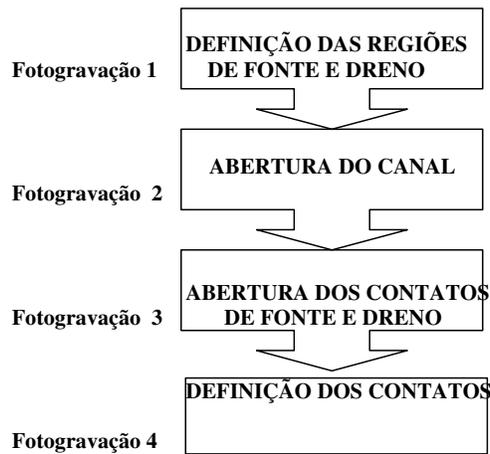


Figura 6.8 – Seqüência das fotograções nas etapas do processo nMOS[06].

A fotogração para abertura das janelas de fonte e dreno no filme de óxido de silício é a etapa mais crítica devido a transferência de linhas com menor largura.

Nas figuras 6.9 e 6.11 são mostradas as estruturas em fotorresiste sobre o óxido após a transferência dos padrões da máscara e na figura 6.10 e 6.12 é mostrada a região do canal dos transistores nMOS com largura de canal de $2\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$ respectivamente, após a corrosão por plasma. Concluimos que o processo de fotogração atende as necessidades deste processo.

Para remover o óxido de silício na região de fonte e dreno utilizou-se um plasma inicial de uma mistura de gases SF_6/Ar , que corrói o óxido com uma taxa

de corrosão de 57nm/min, e em seguida um plasma de uma mistura de gases $CF_4/H_2/Ar$, que coroe com uma taxa de corrosão de 30nm/min [40].

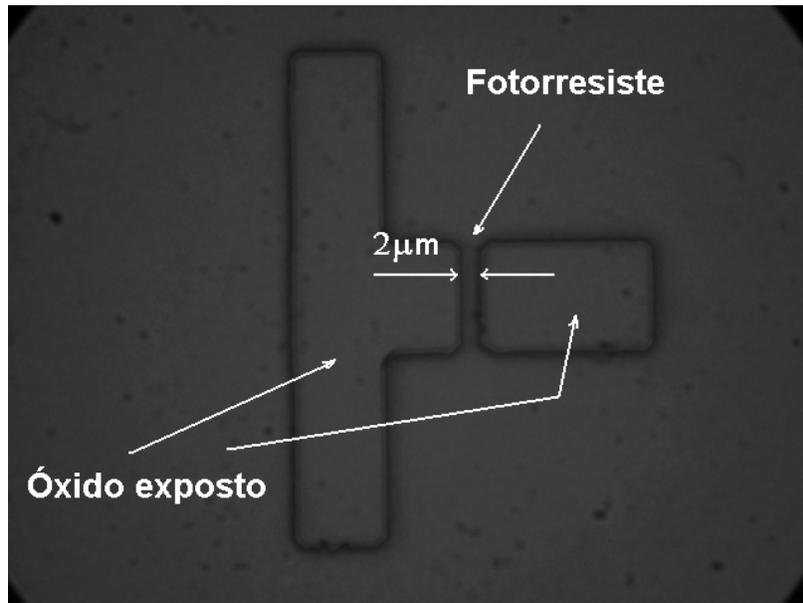


Figura 6.9 – Fotogração de fonte e dreno do transistor nMOS canal com largura de 2µm

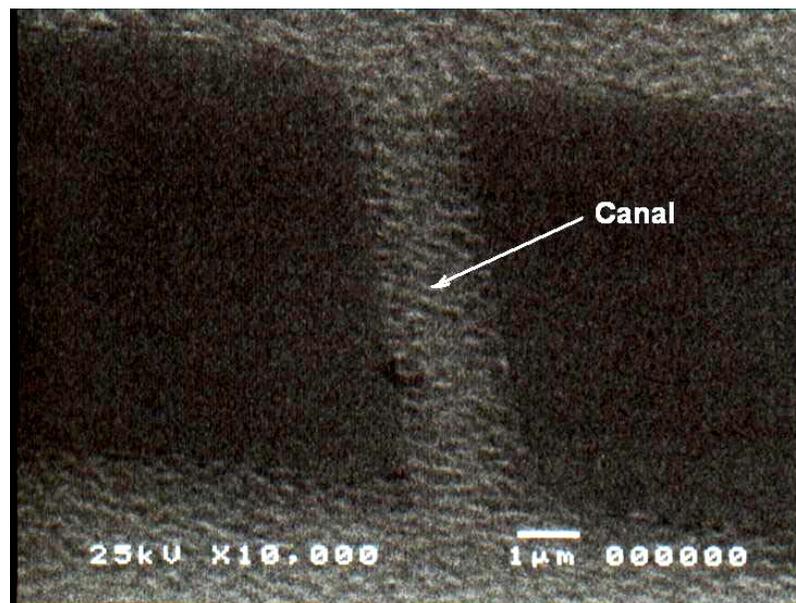


Figura 6.10 – Região do canal do transistor nMOS após a corrosão do filme de óxido de silício

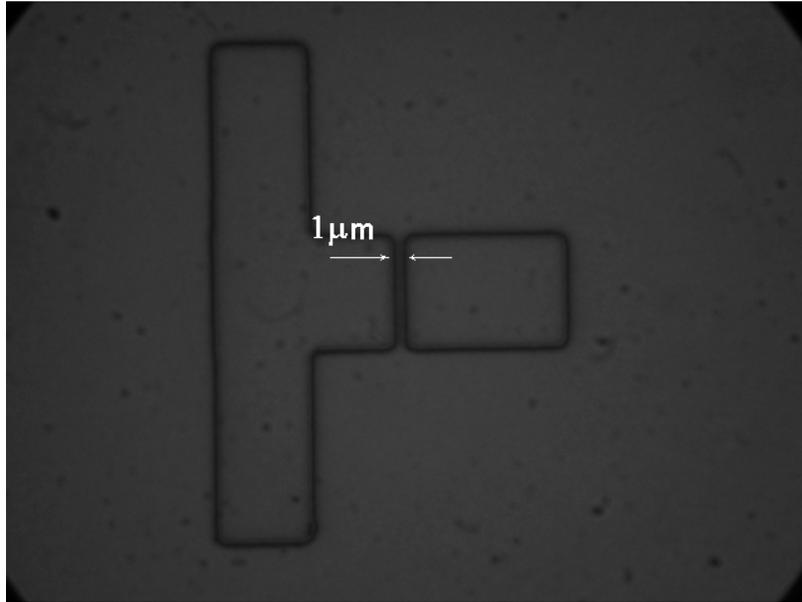


Figura 6.11 – Fotogração de fonte e dreno do transistor nMOS canal com largura de 1 μm

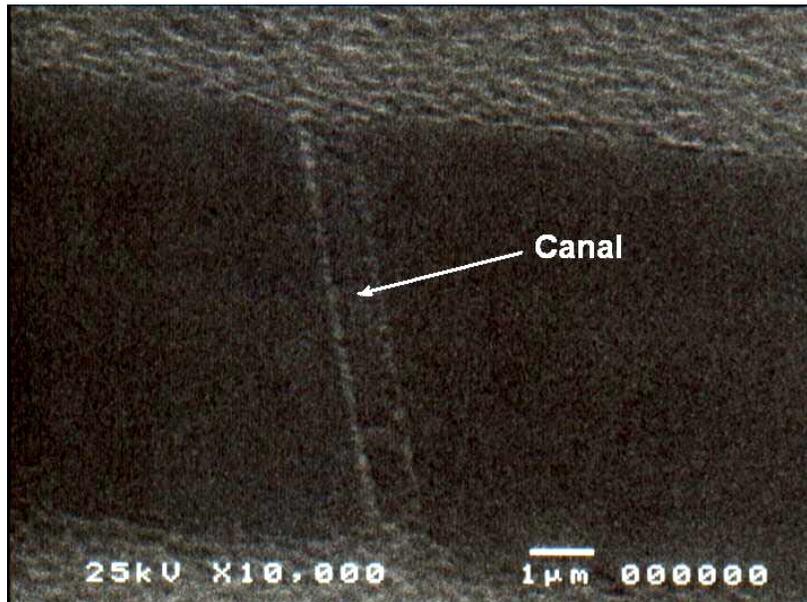


Figura 6.12 – Região do canal do transistor nMOS após a corrosão do filme de óxido de silício

6.2.2.1 Dispositivo Gerador de campo elétrico

Na figura 6.13 é mostrado o resultado da transferência de padrões de uma máscara com linhas periódicas de aproximadamente $2\mu\text{m}$ de largura, para definição dos eletrodos de um gerador de campo elétrico fabricado no CCS.

Este dispositivo será utilizado para fazer observações, em um microscópio, do comportamento de moléculas sobre a ação de campo elétrico.

O processo de fabricação deste dispositivo é composto de apenas uma etapa de fotogração.

A grande dificuldade encontrada na fabricação deste dispositivo foi a aderência dos padrões de fotorresiste no filme de óxido de silício devido a forma dos padrões fotogravados, largura de aproximadamente $2\mu\text{m}$ e comprimento de aproximadamente $400\mu\text{m}$.

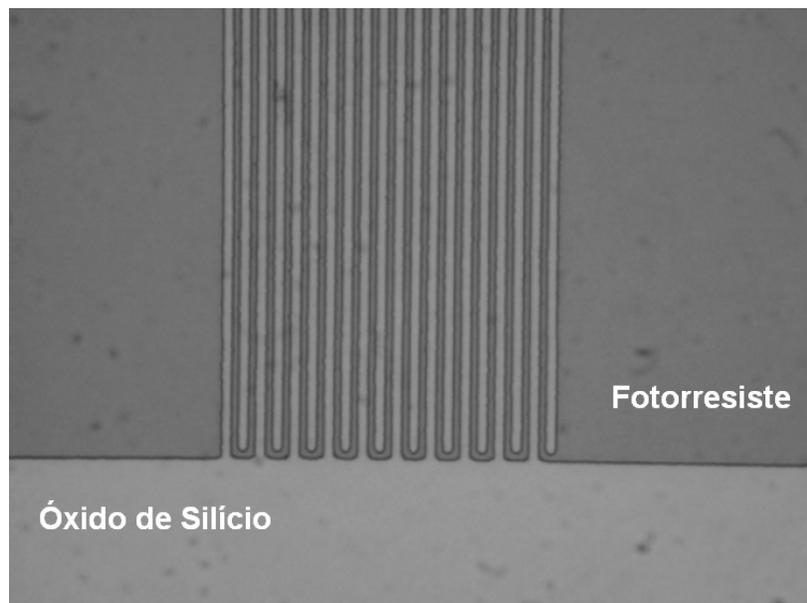


Figura 6.13 – Fotogração para fabricação dos eletrodos do gerador de campo elétrico

Na figura 6.14 é mostrado o dispositivo após a deposição de ouro.

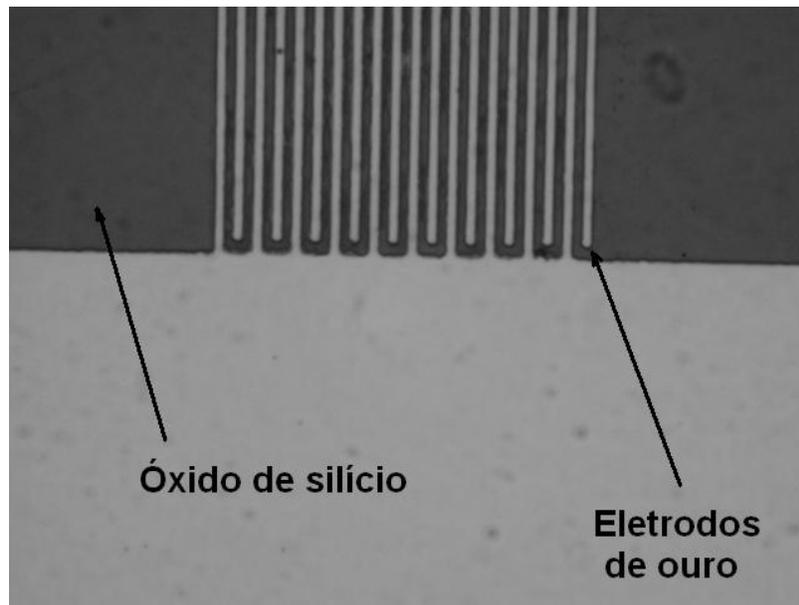


Figura 6.14 – Após deposição de ouro para fabricação dos eletrodos do gerador de campo elétrico

7 Conclusão

Neste trabalho foi realizada a caracterização e a otimização dos processos de fotolitografia utilizados no Centro de Componentes Semicondutores da UNICAMP para a fabricação de dispositivos micrométricos empregando o fotorresiste AZ5214.

O processo de fotogração foi caracterizado a partir do estudo da curva de contraste obtida para diferentes temperaturas de cura, da aderência do filme de fotorresiste ao substrato e da variação da largura de linhas (2-10 μm) fotografadas com diferentes doses de exposição.

O processo otimizado para a obtenção de linhas isoladas de largura de até 2 μm para filmes de fotorresiste com espessura de aproximadamente 1,46 μm , inclui os passos a seguir: desidratação do substrato a 118 $^{\circ}\text{C}$ durante 2 minutos, cura para estabilização do fotorresiste a 118 $^{\circ}\text{C}$ durante 2 minutos e exposição com intensidade de 8mW/cm² durante 20 segundos. A revelação foi feita em solução MIF 312/ H₂O (1:1) durante 30 segundos.

Para linhas periódicas com largura menor que 3 μm e linhas isoladas com largura menor que 2 μm o processo apresentou problemas de resolução. Este problema foi solucionado utilizando fotorresiste diluído, com o qual foram obtidos filmes com espessura reduzida de aproximadamente 700 nm comparando com a espessura de 1,4 μm sem diluição. O processo otimizado de fotogração, onde foram obtidas linhas de até 0,6 μm , inclui: desidratação do substrato a 150 $^{\circ}\text{C}$ durante 5 minutos, aplicação do promotor de aderência, cura para estabilização do fotorresiste a 118 $^{\circ}\text{C}$ durante 2 minutos e exposição com intensidade de 8mW/cm² durante 10 segundos. A revelação foi feita em solução MIF 312/ H₂O (1:1) durante 30 segundos.

É possível obter maior resolução com a utilização de filmes mais finos, obtidos através da diluição do fotorresiste, no entanto, para a utilização destes filmes é necessária a adequação do ambiente de processo pois os filmes

resultantes apresentam maior problema de aderência, variando em função da umidade do ar.

Utilizando os processos otimizados foi possível a fabricação de estruturas complexas de alta densidade, com largura de linhas de $2\mu\text{m}$, que compoem um dispositivo gerador de campo elétrico , e estruturas de baixa densidade, com largura de linhas de $2\mu\text{m}$ a $0,8\mu\text{m}$, em dispositivos CMOS (portas de transistores), utilizando os equipamentos normalmente empregados para a gravação de estruturas com largura mínima de linha de $2\mu\text{m}$.

O objetivo principal deste trabalho foi atingido com o estabelecimento de processos fotolitograficos compatíveis com os processos de microfabricação atualmente empregados no CCS..

Como sugestão para trabalhos futuros podemos citar:

- Estudo do processo de litografia por feixe de elétrons;
- Caracterização e otimização do processo de inversão de imagem (fotogravação invertida);
- Caracterização e otimização do processo de inversão de perfil (*Lift-off*);
- Estudo do processo de revelação a seco do filme de fotorresiste.

Referência Bibliográfica

[01] Malek, C. K., “*Introdução à microlitografia e sua aplicação a microeletônica*”, apostila do curso de microlitografia, IFUSP e LNLS, 1990.

[02] Seabra, A. C., “*Litografia para Microeletrônica*”, disponível em <<http://www.lsi.usp.br/~acseabra/pos/5838.html>>

[03] Livro texto do curso de extensão: Oficina de Microfabricação: Projeto e construção de CI's MOS, CCS e DSIF/FEEC Unicamp.

[04] Takeda E., "Challenges for Giga-scale integration", *Microelectronics and Reliability*, 37(7), p. 985, 1997.

[05] Peter B. Griffin, James D. Plummer, Michael D. Deal, “*Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling*”, Prentice Hall; 1^{ra} edição, Julho 14, 2000

[06] Leandro Tiago Manera, “*Determinação de Regras de Projetos e de Parâmetros de Simulação de um Processo nMOS para Fabricação de Circuitos Integrados*” Dissertação de Mestrado, Faculdade FEEC da UNICAMP, Campinas 2002.

[07] Izaque Alves Maia, “*Técnicas de Usinagem Micro-Mecânicas*”, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM Vol 09 No 1 pp11-13

[08] C. R. Betanzo, M. A. Canesqui, S. A. Moshkalyov, “*Estudo do processo de fotolitografia para fabricação de estruturas micrométricas com o fotorresiste AZ5214*”, Relatório Técnico, CCS Campinas 2002.

[09] J. W. Swart , “*Materiais Elétricos*”, notas de aula do curso de materiais elétricos, Unicamp, 1^o Semestre de 2002.

[10] R. D. Skinner, “*Basic Integrated Circuit Technology Reference Manual*”, Basic Integrated Circuit Manufacturing, Integrated Circuit Engineering Corporation, 1993

[11] W. Scot Ruska, “*Photolithography*”, *Microelectronic Processing*, McGraw-Hill, New York, p. 114, 1987.

[12] A.G. Orsi “*Fotomáscaras e Fotogravação em Semicondutores*”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 1972.

[13] R. B. Darling, *MicroFabrication*, disponível em <<http://www.ee.washington.edu/research/microtech/cam/>>.

[14] Cornell University, “*Microlithography Manua*”, disponível em <www.nnf.cornell.edu/equipment/2002PhotolithManual.pdf>.

[15] P. Rai-Choudrury, “*Handbook of Microlithography and Microfabrication*”, Vol. 1: Microlithography, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, pp. 3-135, 1997.

- [16] A. Hovinen, A. Malinin, A.Lipsanen, "*Lithography in Experimental Environment*" <<http://www.hut.fi/Units/Electron/Publications/publications2000/Reports21.pdf>>.
- [17] C. Mead, L. Conway, "*Introduction to VLSI Systems*", Addison Wesley Publishing Company, Philippines 1980.
- [18] School of Chemical Engineering at the Georgia Institute of Technology, "*Introduction to DNQ-Novolac Resists*" < http://dot.che.gatech.edu/henderson/introduction_to_dnq-novolac__resists.htm >
- [19] Reichmanis, E., Thompson, L.F., "*Chemistry and process for deep-UV resists*", Proceedings of Microelectronic Engineering. v.14, pp.215-26, 1991.
- [20] Lamola, A.A.; Szmanda, C.R.; THACKERAY, J.W., "*Chemically Amplified Resists*", Solid State Technology. v.34, n.8, pp.53-60, Aug. 1991.
- [21] L. C. Kretly, "*Introdução à fotolitografia*", notas de aula do curso Tópicos especiais em microeletrônica, Unicamp, 1º Semestre de 1994.
- [22] W. M. Moreau, "*Semiconductor Lithography Principles, Practices, and Materials*", Plenum Press New York and London, 1987
- [23] R. Mishra, "*Photoresist development on sic and its use as an etch mask for sic plasma etch*", M.S. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Mississippi State University, 2002.
- [24] A.J.Balloni, CenPRA/MCT, "*Processo Integrado EB/GA. Prototipagem Rápida de Circuitos Integrados*", CenPRA/MCT Campinas 1999.
- [25] Wei-Jung Lin, Wen-Chang Chen, "*Theoretical Analysis of Baking Process in Two Polymer/Solvent Systems: PMMA/Anisole and PMDA-ODA/NMP*", Jornal of The Electrochemical Society, 148(11) pp G621-G626, 2001
- [26] J. Bauer and G. Drescher, "*Surface tension, adhesion and wetting of materials for photolithographic process*"; J. Vac Sci Technol B 14 (4) pp. 2485-2492 jul/aug 1996
- [27] Wonkwang Univ, "*Semiconductor science*" < <http://semicon.wonkwang.ac.kr/intro/data/process> >
- [28] L. C. Kretly, E. G. S. Cencig e E. C. Bortolucci, "*Caracterização de fotorresina da família Diazoguinona-Novolac como elétron resiste para microlitografia por feixe de elétrons*", IX Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletônica pp. 671-679 ago/1994.
- [29] Datasheet AZ5200, 'AZ5214 Positive Photoresist for Semiconductors and Microelectronics', Hoechst Japan Ltd, October 1985.
- [30] MEMS and Nanotechnology Clearinghouse < <http://www.memsnet.org/mems/beginner/lithography.html> >

[31] M. A. Hartney, D.W. Hess, D.S. Soane, "Oxygen plasma etching for resist stripping and multilayer lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 7 N^o. 1, pp.1-13, Jan/Feb 1989,

[32] W. Kern and D. A. Poutien, "Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology", *RCA Corporation, RCA Review* 31 (2) 187,1970.

[33] W. A. Cody, M. Varadarajan, "RCA Clean Replacement", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, 6, June, 1996.

[34] M. Bosen, "AZ 5200 Positive Photoresist for Semiconductor and Microelectronics". Catalog. Hoechst Japan Limited. Electronic Materials Division.

[35] M. Bosen, "AZ 5200 Resist for Positive and Negative Patterning". Catalog. Hoechst Japan Limited. Electronic Materials Division.

[36] Manual Karl Suss MJB3 *Standart*

[36] Jason P. Cain, Haolin Zhang, Costas J. Spanos, "Optimum sampling for characterization of systematic variation in photolithography," in *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI*, Daniel J. Herr, Editor, Proceedings of SPIE vol. 4689, 2002.

[37] J.P.Cain, "Characterization of Spatial Variation in Photolithography", M.S. thesis, University of California, Berkeley, 2002

[38] J.C.Pellegrini, "Trends in photolithography analysis and control", *Solid State Technology*, pp87-95, October 1996

[39] Manual do Interferômetro RUDOLF-FTM.

[40] C. R. Betanzo, "Corrosão por plasma para tecnologias CMOS e Microsistemas" Tese de Doutorado, Faculdade FEEC da UNICAMP, Campinas 2003.

[41] Hugo Ricardo Jiménez Grados, "Desenvolvimento de um processo CMOS (2 μ m): Fabricação do chip teste CMOS, células APS e chips didáticos", Tese de Doutorado, Faculdade FEEC da UNICAMP, Campinas 2003.