

# ***Litografia para Microeletrônica***

***Prof. Antonio C. Seabra – acseabra@lsi.usp.br  
Laboratório de Sistemas Integráveis  
Escola Politécnica da USP***

## ***1. Introdução***

**N**o mundo de hoje, onde informatização é uma ferramenta essencial para inúmeras atividades humanas, há grande necessidade por circuitos eletrônicos cada vez mais complexos, capazes de desempenhar as funções mais inusitadas. A primeira vista, estes circuitos poderiam utilizar exatamente a mesma tecnologia utilizada por seus antecessores. Tecnicamente isso não é correto, pois quanto maior o número de componentes de um CI para uma mesma tecnologia, maior a sua dissipação de potência, maior a sua área (implicando em maior número de defeitos) e maior a dificuldade de sincronização de sinais.

Além disso, as tarefas cada vez mais complexas a serem executadas exigem aumento de velocidade de resposta do circuito para que ela seja executada em tempo hábil. Para ocorrer esse aumento de velocidade deve-se reduzir as capacitâncias envolvidas tanto no chaveamento dos dispositivos eletrônicos quanto na propagação dos sinais, que novamente depende da redução nas dimensões empregadas na fabricação do circuito.

Além disso, verifica-se na prática que quanto menor as dimensões dos dispositivos, menor o custo por função executada por esse circuito, como mostra a Fig. 1. A quantidade de dispositivos que pode ser colocada em uma certa área de silício é tão importante que os custos de fabricação são principalmente baseados na área ocupada pelo circuito. Assim, redução nas dimensões mínimas (e conseqüentemente avanço da tecnologia) é fundamental para tornar um produto no estado da arte viável.

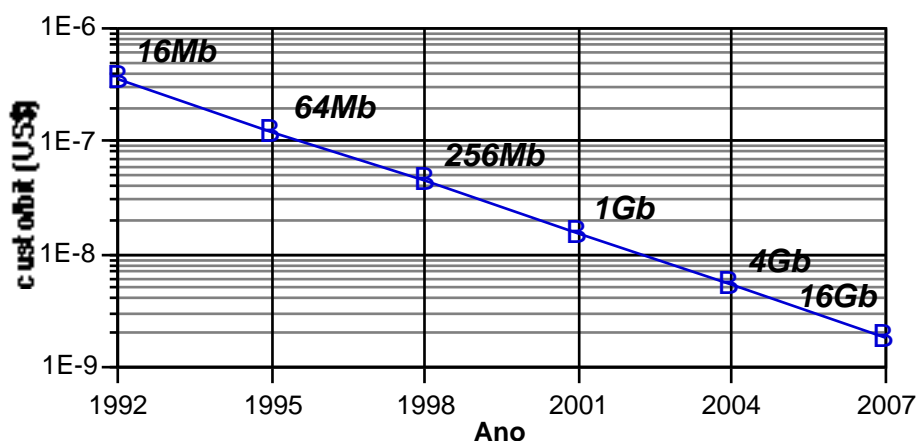


FIG. 1 Redução do custo por bit para memórias DRAM. (FONTE: R. BLEWER<sup>70</sup>)

A Tabela I apresenta uma amostra dessa tendência, pois pode-se considerar que a realização prática dos circuitos aí apresentados só tem sentido econômico se forem empregadas tecnologias que possibilitem a obtenção das dimensões mínimas nela relacionadas.

TABELA I Mínimas dimensões exigidas para a produção de alguns CIs.

Circuitos de Máxima Integração			Circuitos de Máxima Complexidade		
Geração DRAM	Tamanho da Pastilha (mm <sup>2</sup> )	Dimensões Mínimas (μm)	Tipo de Microprocessador	Tamanho da Pastilha (mm <sup>2</sup> )	Dimensões Mínimas (μm)
4Mb	80-90	0,8-0,7	Pentium (Intel)	296	0,8 (BiCMOS)
16Mb	120-140	0,6-0,5	PowerPC 601 (IBM-Motorola)	121	0,65 (CMOS)
64Mb	170-200	0,4-0,3	Alpha 21064 (DEC)	194	0,65 (CMOS)
256Mb	250-300	0,25	SuperSparc (Sun)	256	0,7 (BiCMOS)
1Gb	350-400	0,18	PA7100 (HP)	202	0,8 (CMOS)
4Gb	640	0,13	R4400SC (MIPS)	186	0,6 (CMOS)

Na indústria de semicondutores, 60% do tempo total para fabricação de uma lâmina (4 a 25 semanas) é destinado às etapas litográficas<sup>1</sup>. Isto ocorre

porque até 20 etapas litográficas podem ser necessárias para a fabricação de circuitos CMOS. Além disso, estima-se que a litografia corresponda a 35% do custo total de fabricação de um CI<sup>2</sup>. Portanto, a seleção da etapa litográfica adequada a cada fase da produção torna-se crítica, dependendo da viabilidade técnica, de considerações econômicas e de avaliações tais como volume de produção, tempo de produção, planejamento do produto, etc.

Por surpreendente que possa parecer, resolução não é e nunca foi o fator limitante em litografia para semicondutores. Já em 1960, G. MOLLENSTEDT e R. SPEIDEL<sup>3</sup> publicaram micrografias de algumas poucas letras escritas com um microscópio de transmissão modificado apresentando linhas menores que 100 nm (Fig. 1.1a), que ainda são pelo menos três vezes menores que as linhas empregadas na produção de CIs atualmente. Mais espetacular ainda, em 1990, D. EIGLER<sup>4</sup> e colaboradores empregaram um microscópio de varredura de tunelamento para mover átomos de xenônio sobre uma superfície de níquel e formar linhas da largura de um átomo (Fig. 1.1b). No entanto, gerar um produto comercial empregando tais dimensões é muitíssimo mais complexo, e por essa razão os especialistas de hoje ainda se debatem para produzir memórias de 64Mb, com dimensões mínimas de 350 nm.



FIG. 1.1 a) Exemplo de nanolitografia datado de fevereiro de 1960. (FONTE: G. MOLLENSTEDT e R. SPEIDEL *apud* R. F. W. PEASE<sup>3</sup>); b) Átomos de xenônio alinhados artificialmente. (FONTE: D. EIGLER e E. K. SCHWEIZER<sup>4</sup>)

## 1.1 Requisitos Técnicos da Litografia para Semicondutores

Como mencionado, resolução por si só não é o fator limitante em litografia para semicondutores. A limitação advém do compromisso de obter-se determinada resolução associada a outras características cujos valores são obtidos para uma dispersão de  $\pm 3$ . **1.1.1 Dimensão Crítica e seu Controle**

O termo **resolução**<sup>5</sup> é formalmente definido de acordo com o tipo de sistema litográfico empregado, mas na prática costuma-se empregar o termo **resolução do processo**<sup>6</sup> no lugar de resolução. 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 resiste que estejam livres de falhas indesejáveis e que tenham um perfil adequado. Assim, resolução é uma definição vaga e dependente da aplicação desejada. Por outro lado, entende-se por **dimensão crítica** (*critical dimension – CD*) a largura absoluta da menor estrutura que se deseja produzir (linha, espaço ou janela de contato). O processo litográfico escolhido deve ter melhor resolução que a dimensão crítica estipulada para fabricação do CI.

O **controle da dimensão crítica** (*CD control*) é a habilidade em manter-se a dimensão crítica dentro de limites de variação (%) especificados<sup>7</sup>, seja em várias regiões de uma lâmina ou de lâmina para lâmina, independentemente de variações de processo tais como tempo, posição no campo de exposição, condições de focalização, espessura de resiste, dose de exposição, condições de revelação, etc. O controle da dimensão crítica é um parâmetro global determinado estatisticamente que reflete a qualidade do processo litográfico como um todo. Na prática, sabe-se que alguns parâmetros têm maior influência na sua determinação e portanto faz-se uma medida parcial do controle da dimensão crítica em função da variação de algum parâmetro importante, notadamente dose de exposição e posição focal. O valor de controle de dimensão crítica considerado suficiente para obter-se um controle de processo adequado<sup>8</sup> 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 para um processo de linha piloto empregando novas tecnologias este valor é de  $\pm 8\%$ .

### **1.1.2 Acurácia e Tolerância de Registro**

Uma vez escrita uma estrutura e garantindo-se o seu controle de dimensão crítica, caso seja necessário deve-se verificar a sua **acurácia de registro**<sup>9</sup>, ou seja, se o seu posicionamento absoluto sobre a superfície da lâmina coincide com o desejado. Normalmente se necessita conhecer o posicionamento absoluto em litografia por feixe de elétrons (*e-beam registration*) mas não em litografia óptica.

Um circuito integrado é produzido camada a camada (nível a nível), sendo que o alinhamento e posicionamento de cada camada em relação a outra é de suma importância<sup>10</sup>. Logo, deve-se observar o posicionamento relativo entre níveis, especificando-se uma **tolerância de registro** entre camadas (**interníveis**) (*overlay* ou *registration tolerance – T*). Muitas regras de projeto

---

necessitam de uma tolerância de registro de no máximo  $\frac{1}{5}$  da dimensão crítica<sup>11</sup>. Principalmente em litografia óptica, o fator mais crítico de um equipamento é a sua tolerância de registro, e não o controle de dimensão crítica<sup>12,13</sup>.

Este fato é facilmente observável considerando-se por exemplo qual o efeito da variação de 1°C na temperatura da lâmina de silício durante a exposição. O coeficiente de expansão térmica do silício<sup>14</sup> é de  $2,33 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , o que significa que para dois pontos distantes entre si de 10 cm na superfície da lâmina, se um deles estiver posicionado exatamente onde desejado, ocorrerá um erro de registro de 0,233  $\mu\text{m}$  no segundo ponto. Desta forma, a menor dimensão utilizável seria de 1,16  $\mu\text{m}$  segundo as regras de projeto. Isto mostra claramente a dificuldade em manter-se uma tolerância de registro adequada para tecnologias submicrométricas.

Devido a essa limitação, muitas vezes não se expõe uma lâmina globalmente, mas por partes ou por campos (*fields*) executando-se um alinhamento localizado para cada campo exposto e melhorando portanto a tolerância de registro em toda a extensão da lâmina<sup>15</sup>.

### 1.1.3 Características do Resiste

Outro fator importante é o conjunto de características do material sensível que está sendo empregado (resiste). Naturalmente, é desejável que o perfil do resiste já revelado seja perpendicular à superfície da lâmina, como mostra a Fig. 1.2a. No entanto, a absorção de energia<sup>16,17</sup> no resiste durante a exposição dificilmente resulta nesse tipo de perfil. Um coeficiente de absorção de energia alto implica em um perfil do tipo cogumelo, Fig. 1.2b, já que a maior parte da energia é absorvida na superfície (efeito pelicular) e o resiste abaixo da superfície será subexposto (note que neste exemplo assume-se um resiste que na ausência de exposição é completamente removido da superfície da lâmina – resiste negativo). Um coeficiente de absorção de energia baixo implica em um perfil do tipo triangular, Fig. 1.2c, devido a uma subexposição da superfície, considerando que esta permanece mais tempo sob ação do banho revelador.

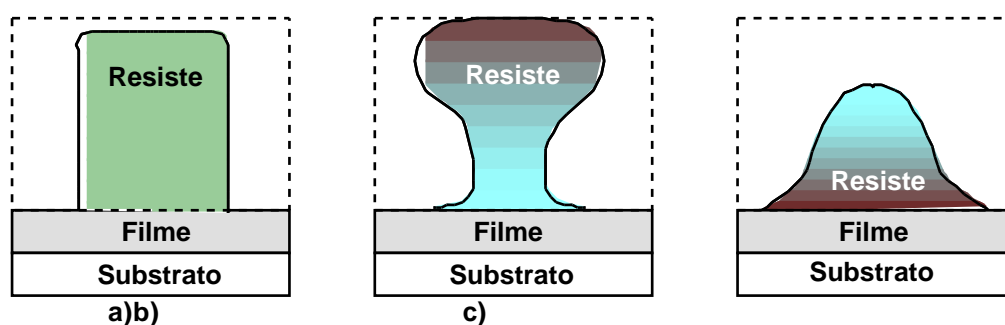


FIG. 1.2 a) Perfil ideal de resiste; b) Resiste negativo com coeficiente de absorção elevado; c) Resiste negativo com coeficiente de absorção muito baixo.

Efeitos de interação com o substrato também alteram o perfil do resiste<sup>18</sup>. Em litografia óptica é muito conhecido o fenômeno de ondas estacionárias (*standing waves*) que ocorre no resiste caso haja reflexão de energia da interface resiste/substrato propiciando o aparecimento de fenômenos de interferência construtiva e destrutiva que causam a absorção não uniforme de energia ao longo da espessura do resiste (Fig. 1.3a). Em litografia por feixe de elétrons ocorre o efeito de proximidade (*proximity effect*), onde elétrons que atingem o substrato são retroespalhados e expõem ou superexpõem outras regiões do resiste (Fig. 1.3b). Além disso, a existência de degraus no substrato também causa o surgimento de variações na energia absorvida pelo resiste, que por sua vez altera a largura da estrutura sendo definida sobre o degrau (Fig. 1.3c).

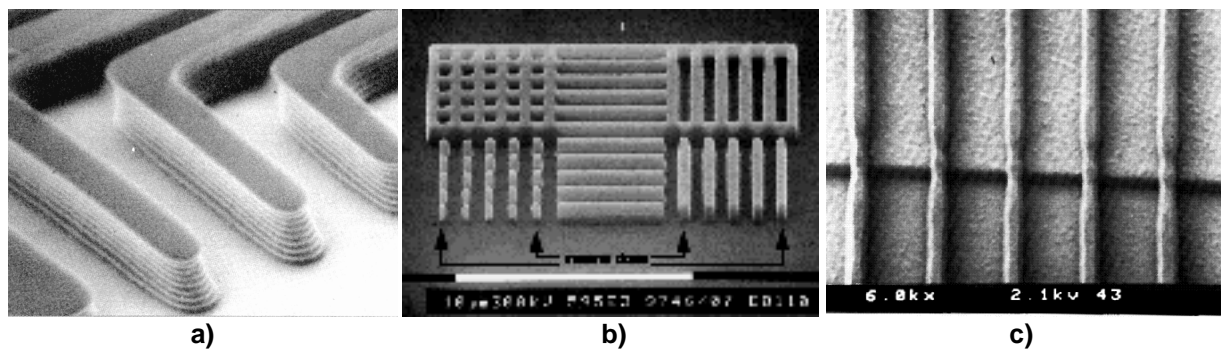


FIG. 1.3 a) Efeito de onda estacionária para uma linha, resultando no aparecimento de patamares no perfil do resiste; b) Efeito de proximidade em litografia por feixe de elétrons; c) Efeito de estreitamento da largura do resiste (*notching*) ao passar sobre um degrau.

### 1.1.4 Defeitos

Considerando-se que um circuito integrado tenha sido adequadamente fabricado do ponto de vista de processamento, ainda existe um fator adicional a ser considerado que é a existência de defeitos. Defeitos podem ser classificados como defeitos puntiformes aleatórios ou defeitos não aleatórios<sup>19</sup>. 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 (*chip*) é chamado de

defeito fatal (*killing defect*) e no caso de particulados é geralmente aceito que um defeito puntiforme de  $\frac{1}{3}$  do tamanho da dimensão crítica é um defeito fatal<sup>20,21</sup>.

Com o aumento da área das pastilhas e a aproximação das vias de interconexão, o número e o tamanho de defeitos precisa ser diminuído pois para uma dada tecnologia, aumentando-se o tamanho da pastilha diminui-se o rendimento. Uma vez que defeitos têm limitado o aumento no tamanho das pastilhas, a única forma de aumentar a complexidade dos circuitos é diminuindo-se a dimensão crítica. A Fig. 1.4 mostra que, por exemplo, para a produção de CI's com dimensões mínimas de  $0,5 \mu\text{m}$  (como memórias de 16Mb) são necessárias<sup>22</sup> densidades de defeitos menores que  $0,1 \text{ defeito}/\text{cm}^2$ . Essa projeção indica que no ano 2004 a densidade de defeitos será medida por metro quadrado.

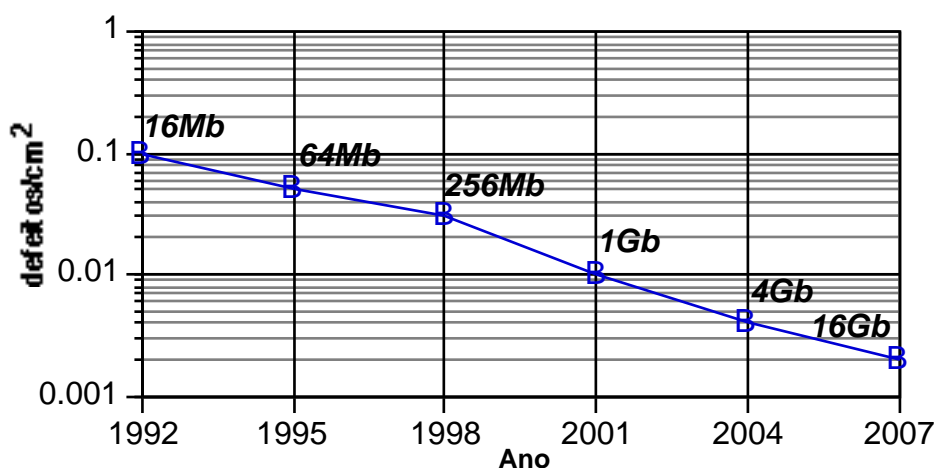


FIG. 1.4 Previsão da densidade de defeitos permitida para memórias DRAM. (FONTE: R. BLEWER<sup>21</sup>)

### 1.1.5 Conclusões

Um processo litográfico de sucesso não se preocupa apenas com resolução, mas com reprodutibilidade na extensão de toda a lâmina e de lâmina para lâmina, capacidade de trabalhar com diversos tipos de estruturas e substratos, insensibilidade a variações de parâmetros dos quais não se tem controle absoluto (temperatura, alteração de características de materiais com o tempo, desgaste de componentes, etc.) e limpeza de processo. No passado, nem todas essas variáveis eram consideradas de grande importância no controle do processo. Hoje em dia, considera-se que todas as partes integrantes do processo influenciam o resultado esperado dentro de limites apreciáveis.

---

## 1.2 Requisitos Econômicos da Litografia para Semicondutores <sup>23</sup>

Na escolha de ferramentas que possam executar uma tarefa específica, o custo é uma preocupação fundamental. O custo total de fabricação de uma lâmina é dividido em custos de pessoal, equipamentos, insumos e despesas gerais. Embora litografia seja apenas uma etapa dentre muitas na fabricação de CIs, seu uso repetido na mesma lâmina torna-a a mais importante em termos econômicos. O custo para fabricar uma pastilha que esteja operando corretamente e que passou por  $m$  etapas de processo é dado por:

$$\text{Custo/Pastilha} = \frac{\frac{\sum_{n=1}^m (\text{pessoal} + \text{equipamento} + \text{insumos} + \text{despesas gerais})_n}{\text{Rendimento Total}}}{n^{\circ} \text{ total de pastilhas por lâmina}} \quad (1.1)$$

O custo total para fabricação de um CI deve incluir além do custo por pastilha, os custos de teste elétrico (*electrical probing*), montagem (*assembly*), encapsulamento (*packaging*) e teste final.

O custo de fabricação de uma lâmina é dependente das dimensões mínimas empregadas, em primeira instância devido ao aumento do custo de litografia. A medida que o rendimento do processo de produção é menor, tornam-se de menor importância econômica os custos de testes, montagem, e encapsulamento ao passo que o custo dos processos litográficos, estando embutido nos custos de produção da lâmina, torna-se mais importante. Logo, quanto mais complexo e imaturo o processo, maior a importância da litografia no custo total de fabricação de um CI. Por essa razão, a fim de empregar sempre um processo maduro, hoje em dia litografia é cada vez mais um exercício de otimização do sistema que propriamente de revolução tecnológica.

## 1.3 Tendências Atuais

Para a fabricação dos CIs várias técnicas litográficas estão à disposição. Em um sentido amplo elas são classificadas em técnicas de litografia óptica, litografia por feixe de elétrons, litografia por feixe de íons e litografia por raios X. Dentre elas, as de maior interesse atual são a litografia óptica, a litografia por feixe de elétrons e a litografia por raios X.

A aplicação de cada uma dessas técnicas está intrinsecamente ligada ao volume de produção e à resolução desejada.



---

Por exemplo, em **linhas de pesquisa e desenvolvimento** as questões técnicas são as mais importantes. Em geral, empregam-se vários processos distintos e até tecnologias distintas e o número de exemplares de cada produto não atinge a centena. Além disso, é muito comum a execução de pequenos experimentos em grande número sem que se fabrique um único componente. Nesta classe, são de extrema importância a flexibilidade e rapidez de produção para possibilitar o estudo de novas idéias e portanto o custo não é o fator principal a ser considerado.

No outro extremo, em instalações para **altíssimo volume de produção** encontra-se apenas um tipo de processo e um único produto. O processo é inflexível e o mais objetivo possível, dando ênfase à minimização de operações, máxima eficiência, maior rendimento e menor tempo de fabricação possível.

A litografia óptica é responsável pela maior parte da produção atual de CIs pois é uma técnica de alto volume de produção. A impressão por projeção<sup>24</sup>, sempre que os requisitos técnicos sejam satisfeitos, é em geral o método de produção mais econômico.

A litografia por feixe de elétrons sempre teve como principal atrativo a resolução e precisão de registro. Já foram definidas estruturas com 30 nm em resistes convencionais<sup>3</sup>, sendo que a precisão de registro atual é da ordem de 70 nm, suficiente para a fabricação de memórias de 64 Mb por escrita direta<sup>25</sup>. A grande dificuldade dessas técnicas é a baixa produtividade, que as torna de pouco interesse em plantas industriais.

A litografia por raios X é vista atualmente como a sucessora da litografia óptica para a produção de CIs em altos volumes de produção. A sua concepção é uma extensão da litografia óptica, apenas se reduzindo o comprimento de onda bruscamente (entre 0,5nm e 1,0nm) de tal forma a permitir a utilização de impressão por proximidade. Atualmente, além do alto custo de investimento em equipamentos (uma fonte *synchrotron* custa em torno de US\$ 30 milhões e pode suportar dez equipamentos litográficos que custam<sup>26</sup> US\$ 3 milhões cada e que por sua vez empregam máscaras com custo em torno de US\$ 10 mil a unidade) os problemas referentes à construção das máscaras precisam ser resolvidos<sup>3</sup>.

Pode-se dizer portanto que a litografia óptica domina o mercado de produção atual e vai continuar dominando o mercado no futuro próximo; litografia por feixe de elétrons domina o mercado de confecção de máscaras atual, domina projetos de pesquisa de ponta onde se empregam dimensões críticas abaixo da resolução dos processos litográficos ópticos atuais e também é

---

importante em determinados ASICs; e litografia por raios X que provavelmente será a sucessora da litografia óptica para memórias de 1Gb ou mais densas, mas que no momento não tem aplicação prática significativa.

#### **1.4 Frentes de Pesquisa**

As frentes de pesquisa em litografia têm atualmente um caráter de otimização muito acentuado. Isto se deve em grande parte ao investimento já realizado na área e conseqüente relutância de fabricantes em perdê-lo<sup>27</sup>. Assim, as pesquisas concentram-se sobremaneira em formas de melhorar o desempenho da litografia óptica e da litografia por feixe de elétrons. Por outro lado, a litografia por raios X que é a provável opção do futuro tem sido intensamente investigada mas sua aceitação ainda é incerta. É difícil prever quando ocorrerá uma transição de litografia óptica para de raios X, pois os problemas a se resolver tanto para o avanço da primeira quanto para a aceitação da segunda são substanciais. A experiência tem mostrado que litografia óptica pode continuar sendo a solução. Por outro lado, a evolução da tecnologia de semicondutores tem fornecido exemplos dramáticos de aceitação de novas tecnologias, como a transição de difusão em fase de vapor para implantação iônica, processamento térmico em fornos para processamento térmico rápido e corrosão em banho líquido para corrosão por plasma.

Deve-se observar que os avanços podem ser realizados em quatro áreas distintas: tecnologia empregada, equipamentos de processo, equipamento de exposição e material de resiste. A tecnologia empregada pode em determinadas circunstâncias auxiliar o desempenho litográfico. Como exemplo cite-se o emprego de camadas de planarização que reduzem degraus ( $\pm 0,075\mu\text{m}$ ) antes da exposição e facilitam a exposição<sup>28</sup>. Esta técnica tem seu expoente máximo na técnica de polimento mecânico químico<sup>29</sup> (*Chemical Mechanical Polishing* – CMP) empregada pela IBM na fabricação da pastilha PowerPC. A Fig. 1.5 apresenta o resultado dessa inovação tecnológica.

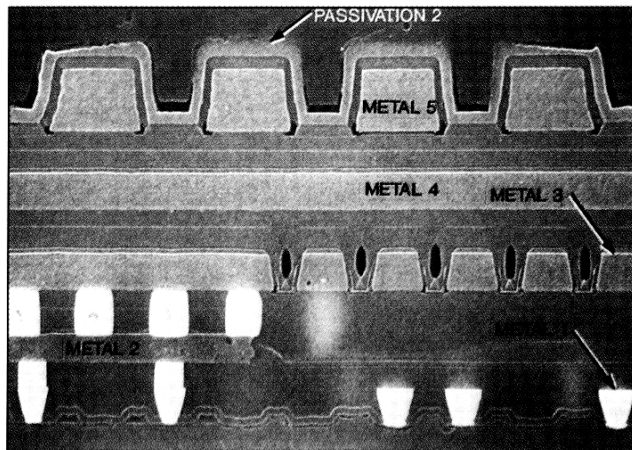


FIG. 1.5 Apesar dos seus 5 níveis de metal, o visual harmonioso da pastilha PowerPC-601 da IBM é atribuído à planarização por polimento mecânico químico. (FONTE: A. DENBOER<sup>30</sup>).

Outra forma de melhorar o processo litográfico é atuando-se nos equipamentos periféricos de processo (considerando-se um mesmo equipamento de exposição e resiste) que podem ser aperfeiçoados de forma a garantir uma maior reprodutibilidade do processo litográfico e com isso podem até melhorar a sua resolução. Um exemplo disso é a integração de estações de processamento de resistes com os equipamentos de exposição<sup>31</sup>.

No entanto, as duas áreas que concentram os maiores esforços na melhoria da litografia são a de equipamentos de exposição e a dos materiais dos resistes.

### 1.4.1 Melhoria em Equipamentos de Exposição

#### 1.4.1.1 Litografia Óptica

Em litografia óptica, o principal objetivo é obter-se maior resolução com maior profundidade de foco. Por profundidade de foco entende-se a habilidade do sistema em manter o foco para pontos situados em diferentes posições da espessura do resiste. Se houver uma desfocalização excessiva, a energia é dispersada espacialmente e portanto o resiste não é sensibilizado adequadamente (a Nikon define<sup>32</sup> a profundidade de foco como a distância onde o contraste da imagem latente no resiste é maior que 60% da condição de pleno foco). Este problema é especialmente grave se a superfície da lâmina em processamento apresentar topografia bastante irregular, com vários degraus. As duas expressões fundamentais para o estudo desses parâmetros são<sup>33,34</sup>:

$$\text{Resolução} = \frac{k_1}{NA} \quad (1.2)$$

---

$$DOF = \frac{k_2}{(NA)^2} \quad (1.3)$$

onde DOF é a profundidade de foco (*depth of focus*),  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz utilizada, NA é a abertura numérica do sistema de lentes empregado,  $k_1$  é uma constante que depende das condições de processo e da técnica litográfica empregada e  $k_2$  é uma constante que depende do sistema óptico empregado.

De acordo com essas expressões, as regras de escalamento sugerem que aumentando-se a resolução, a profundidade de foco é reduzida (para a situação limite). Isto é o que ocorre quando se empregam aberturas numéricas NA cada vez maiores (implicando em sofisticação do sistema de lentes) ou comprimentos de onda menores (fonte de radiação modificada). A pesquisa é intensa na utilização de lasers de excímeros<sup>35,36,37,38</sup> para a obtenção de luz no ultravioleta profundo (*deep ultra violet – DUV*) como fonte de radiação. No entanto, ambas as abordagens reduzem a profundidade de foco tal que hoje em dia sistemas de alta resolução apresentam DOF reduzidos, da ordem das variações topográficas na superfície de um circuito ULSI<sup>38</sup>. No final dos anos 80, a DOF necessária para o processo começou a limitar a resolução prática dos sistemas ópticos<sup>39</sup>. Os sistemas litográficos disponíveis atualmente<sup>40</sup> para a fabricação de dispositivos com dimensão crítica de 0,35  $\mu\text{m}$  apresentam DOF em torno de 1 $\mu\text{m}$ , que está no limiar do aceitável.

Do ponto de vista prático precisa-se empregar artifícios para aumentar a resolução sem sacrificar a profundidade de foco. Três idéias práticas que têm atraído atenção são as máscaras com deslocamento de fase<sup>41,42</sup> (*phase shifting masks – PSM*), os sistemas de iluminação modificados<sup>32,43,44</sup> e a técnica de correção do efeito de proximidade óptico<sup>45</sup> (*optical proximity correction – OPC*)

#### 1.4.1.2 Litografia por Feixe de Elétrons

A litografia por feixe de elétrons, além da alta resolução possui excelente profundidade de foco e difração negligível<sup>46</sup>. Além disso, como elétrons são partículas carregadas eletricamente elas podem ser facilmente focalizadas e defletidas por campos magnéticos e eletrostáticos. Por outro lado, os elétrons do feixe ao chocarem-se com o material a ser sensibilizado sofrem um processo de espalhamento que depende do peso atômico do material onde o feixe incide. No caso dos materiais silício<sup>47</sup> e arseneto de gálio, além do *espalhamento direto* (*forward scattering*) o feixe sofre *retroespalhamento* (*backscattering*), ou seja, alguns elétrons invertem o sentido de sua trajetória e retornam na direção da

fonte que os originou. No caso do substrato estar recoberto com um filme sensível, este filme é sensibilizado nas áreas expostas e a seguir, após atingirem o substrato, alguns elétrons retornam e re-sensibilizam o resiste em áreas que não foram expostas previamente (e que podem estar a algumas micra do ponto de incidência desses elétrons). A Fig. 1.6 mostra este fenômeno. O resultado disto é que as estruturas sensibilizadas perdem a definição de borda e controle de CD e regiões supostamente não expostas podem receber uma dose de energia equivalente a de regiões intencionalmente expostas.

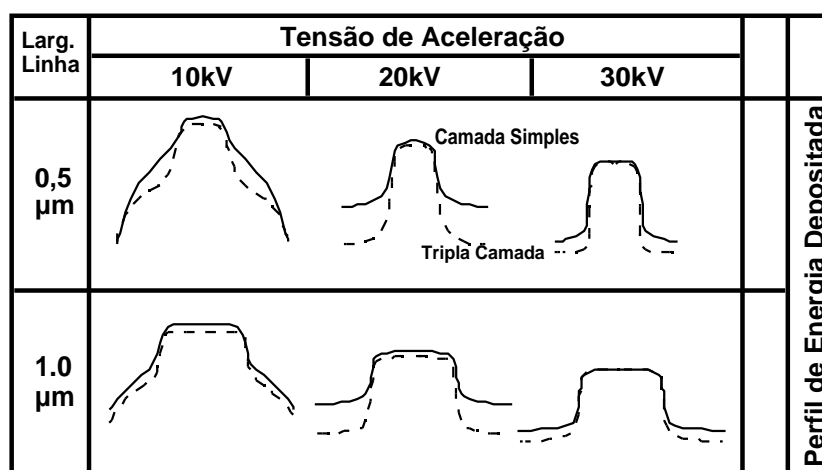


FIG. 1.6 Perfil de energia depositado ao longo da espessura do resiste para linhas de 0,5 $\mu\text{m}$  e 1,0 $\mu\text{m}$  quando se varia a tensão de aceleração.

Este efeito de exposição indesejada é conhecido como *efeito de proximidade (proximity effect)* e é altamente dependente da energia do feixe incidente, como mostram os perfis de energia apresentados anteriormente.

Para minimizar o impacto do efeito de proximidade sobre a dimensão e perfil das estruturas, normalmente é feito um tratamento por algoritmos matemáticos que procuram variar a dose do feixe incidente de região a região de tal forma que, considerando-se matematicamente o efeito de proximidade, as estruturas apresentem as dimensões e formatos desejados. É claro que isso requer um poder computacional elevado, mas por outro lado os cálculos são feitos de antemão e os resultados são fornecidos ao equipamento de exposição apenas quando a exposição estiver sendo realizada. É importante destacar também que os algoritmos que implementam a correção de efeito de proximidade dependem de dados ou constantes extraídas do sistema materiais/equipamento de feixe de elétrons utilizado. Assim, existe um trabalho extenso e complexo na determinação desses parâmetros para que o algoritmo adeque-se ao processo empregado e inúmeras abordagens são encontradas em literatura com esse propósito<sup>49, 50, 51, 52</sup>.

O maior problema em litografia por feixe de elétrons é sem dúvida a lentidão de exposição. O tempo total de exposição<sup>53</sup> da lâmina inclui o tempo para carregar e descarregar lâminas, o tempo para movimentar o estágio de campo para campo de exposição, o tempo para acomodar os amplificadores de deflexão antes de cada exposição e naturalmente o tempo total de exposição propriamente dito. Este último pode ser expresso por:

$$\begin{aligned} T_{TOTAL\ ex} &= N_s \cdot T_{ex} \\ &= (nAP / d^2) \cdot (S / J_d) \end{aligned} \quad (1.4)$$

onde  $N_s$  é o número total de eventos de exposição,  $T_{ex}$  é o tempo de exposição por evento,  $n$  é o número de pastilhas (*chips*) por lâmina,  $A$  é a área total da pastilha,  $P$  é a porcentagem da área da pastilha a ser exposta,  $d$  é o diâmetro ou largura do feixe de exposição,  $S$  é a sensibilidade do resiste e  $J_d$  é a densidade de corrente do feixe. Para o caso de um feixe gaussiano, o primeiro termo entre parênteses fornece o número de unidades mínimas (*pixels*) a serem expostas e o segundo termo entre parênteses fornece o tempo de exposição por pixel. Para o caso de um feixe pré-moldado, o primeiro termo entre parênteses fornece o número de moldes (geometrias pré-definidas) a serem expostos e o segundo termo entre parênteses fornece o tempo de exposição por molde. O tempo total de escrita para uma lâmina pode ser expresso por<sup>54</sup>:

$$T = N_s \cdot (T_{ex} + T_s) + T_{oh} \quad (1.5)$$

onde  $T_s$  é o tempo de acomodação (*settling time*) do sistema de deflexão eletrostática por evento de exposição e  $T_{oh}$  é o tempo de preparação (*overhead time*) que inclui os tempos para movimentação do estágio, de evacuação, de calibração e outros.

À custa do tempo de exposição, resoluções extremamente elevadas podem ser obtidas empregando-se feixes de diâmetros pequenos<sup>25</sup> (entre 10nm e 50nm). Empregando-se o critério de Rayleigh para sistemas ópticos limitados por difração<sup>55,56</sup>, pode-se calcular a resolução e a profundidade de foco de um sistema de litografia por feixe de elétrons empregando as mesmas expressões utilizadas para litografia óptica (exp. 1.2 e exp. 1.3 ), apenas assumindo-se que para um pequeno,  $sen \theta \approx \theta$ , que  $k_1 = 0,61$  na prática e  $k_2 = M^2/2$  para feixe de elétrons:

$$Resolução = 0,61 \lambda / NA \quad (1.6)$$

$$DOF = \lambda / 2 NA^2 \quad (1.7)$$

onde  $M$  é a magnificação do sistema,  $\theta$  é o ângulo de convergência da abertura e  $\lambda$  é o comprimento de onda dos elétrons, dado por<sup>57</sup>:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 q \sqrt{V_0 + \frac{q^2 V_0^2}{c^2}}} \quad (1.8)$$

e  $h$  é a constante de Planck,  $m_0$  é a massa de repouso do elétron,  $q$  é a carga do elétron,  $c$  é a velocidade da luz e  $V_0$  é a tensão de aceleração dos elétrons em volts. Portanto:

$$\lambda = \frac{1,227}{\sqrt{V_0(1 + 0,978 \times 10^{-6} V_0)}} \text{ [nm]} \quad (1.9)$$

onde  $V_0$  é a tensão de aceleração dos elétrons em volts.

Como exemplo, se  $V_0 = 20\text{kV}$ ,  $M = 1e$  e  $\theta = 0,05$  mrad, então a resolução do sistema será  $0,10\mu\text{m}$  e a profundidade de foco será  $\pm 1,7\mu\text{m}$ .

Para reduzir  $T_{ex}$  duas abordagens já estão consagradas. Aumenta-se a densidade de corrente do feixe ou diminui-se a sensibilidade do resiste. A utilização de fontes de  $\text{LaB}_6$ <sup>58,59</sup> ou de emissão de campo<sup>25</sup> no lugar de filamentos de tungstênio proporcionam maior densidade de corrente  $J_d$  e menor aberração cromática. Observe-se que a densidade de corrente que pode ser produzida em um feixe de elétrons depende não só do brilho da fonte mas também da qualidade das lentes da coluna<sup>60</sup>, normalmente quantificada pelas aberrações (cromática e esférica) das lentes. As aberrações determinam quão rapidamente o feixe aumenta de tamanho quando se aumenta o ângulo de convergência do feixe. Logo, se as aberrações são grandes, deve-se utilizar pequenos ângulos de convergência, impossibilitando o emprego de feixes de grande diâmetro. Por outro lado, a resolução do feixe<sup>61</sup> (que pode ser verificada pelo gradiente de energia de exposição na borda do feixe) também está intimamente associada às aberrações e à densidade de corrente, de tal forma que na prática nem sempre um feixe de grande diâmetro é possível.

A principal causa da lentidão dos sistemas de escrita por feixe de elétrons é a sua natureza serial, refletindo-se em um grande número de eventos de exposição. A diminuição do número de eventos de exposição  $N_S$  apresenta o maior ganho em termos de produtividade<sup>54</sup> por aumentar o grau de paralelismo da exposição. Por exemplo, aumentando-se o diâmetro do feixe,  $d$ , por meio de janelas de formatos pré-moldados, como retângulos, aumenta-se a área exposta simultaneamente. Apesar desses avanços, se memórias DRAM de 64Mbit e 256Mbit fossem fabricadas com um sistema de litografia por feixe de elétrons de ponta com  $J_d = 10 \text{ A/cm}^2$ ,  $S = 1\mu\text{C/cm}^2$ ,  $T_S = 100\text{ns}$ , e assumindo-se que o nível

mais complexo para a fabricação dessas memórias (o nível de porta) exija a exposição de aproximadamente 10% da área total da pastilha ( $N_S = 3 \times 10^8$  ou  $1 \times 10^9$ ), o tempo de exposição total por pastilha seria de 50s ou 200s respectivamente, como mostra a Fig. 1.7. Por comparação, um sistema avançado de litografia óptica possui uma produção 100 vezes maior.

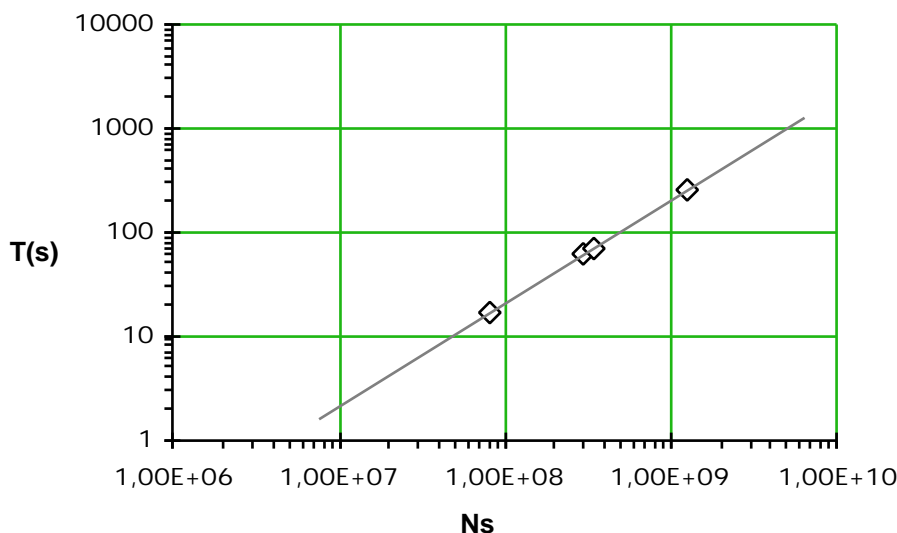


FIG. 1.7 Tempo total ( $T$ ) de exposição por pastilha em função do número de eventos de exposição ( $N_S$ ). (FONTE: Y. NAKAYAMA ET AL<sup>54</sup>)

A utilização de sistemas com feixes de formatos pré-moldados<sup>62</sup> operam como um conjunto de feixes de formato fixo sendo expostos simultaneamente e portanto aumentam o grau de paralelismo como mencionado anteriormente e mostrado na Fig. 1.8a, embora para estruturas ULSI este ganho seja pequeno. Neste caso,  $N_S$  ainda depende do nível de integração da pastilha e aumenta rapidamente com a complexidade da mesma. Já no sistema por projeção de células<sup>54,63,64</sup>, o feixe molda-se ao formato das células por meio da inclusão de uma segunda abertura, como mostra a Fig. 1.8b, e assim expõe um conjunto delas em uma única exposição. Neste caso o número de eventos de exposição não mais depende da complexidade da pastilha e sim da área coberta pela máscara da segunda abertura. Devido aos problemas de aberração das lentes, o limite prático para o tamanho do feixe (campo de iluminação) restringe-se a aproximadamente  $2,5 \times 10^9$  pixels<sup>65</sup>, que para uma resolução de  $0,1 \mu\text{m}$  corresponde a um campo de  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ , insuficiente para acomodar uma pastilha inteira. Para aplicações práticas é necessário empregar-se o método de projeção de células em associação com o método de pré-moldagem do feixe, e portanto a segunda abertura deve conter mais que um tipo de formato (ou máscara).



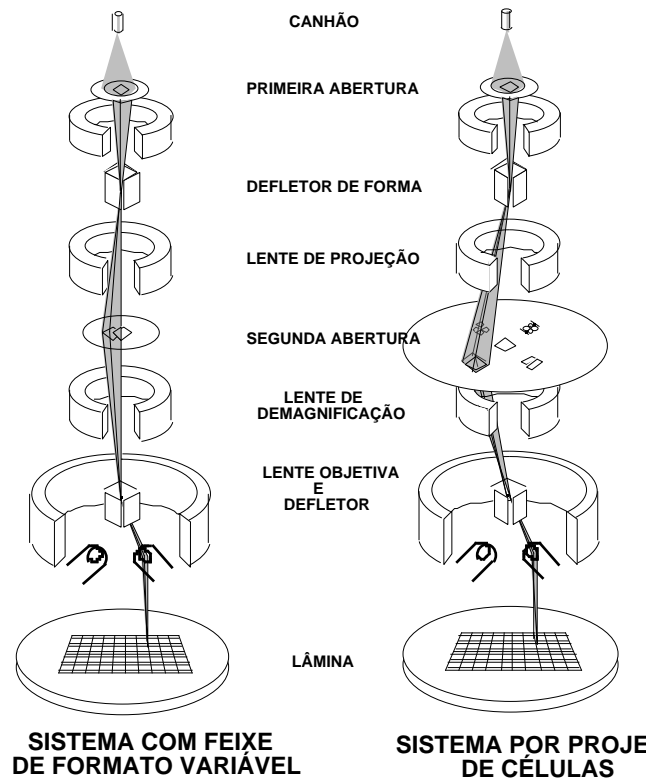


FIG. 1.8 Comparação das colunas de feixe de elétrons empregadas para a obtenção de: a) feixes de formato variável e b) feixes em forma de células. (FONTE: S. OKAZAKI<sup>38</sup>)

Com o método por projeção de células obtém-se um grau de paralelismo considerável. Pode-se empregar esquemas que procurem tornar esse processo ainda mais paralelo. Para tanto, empregam-se conceitos bastante difundidos em litografia óptica: pode-se utilizar um sistema de proximidade por passo e repetição<sup>66</sup> ou um sistema de projeção por passo e repetição<sup>65,67</sup> ou global<sup>68</sup>, de tal forma que várias estruturas são expostas simultaneamente. Observe-se no entanto que a produção de máscaras precisas com dimensões do tamanho da lâmina é um trabalho formidável. Para isso contibuem os efeitos de proximidade pois eles afetam diferentemente geometrias de tamanhos diversos, obrigando a correções localizadas na máscara para estruturas acima de  $1\mu\text{m}$  e alguma forma de modulação da energia do feixe para estruturas sub-micrométricas.

Como geralmente os sistemas que empregam máscaras encontram problemas justamente na confecção destas últimas, outras formas de aumentar-se o paralelismo de exposição foram vislumbradas. A mais interessante emprega feixes múltiplos, onde cada feixe expõe uma parte diferente da mesma pastilha ou então expõe exatamente a mesma estrutura em diferentes pastilhas da lâmina, tudo simultaneamente. Com esta abordagem elimina-se o problema da máscara e também se permite a correção de efeitos de proximidade por meio da modulação da energia do feixe. A Fig. 1.9a apresenta um desses sistemas<sup>69</sup> onde se ilumina uniformemente uma lente em forma de grade (que na realidade opera

como um conjunto de pequenas lentes) e os elétrons que passam pela abertura dessas lentes são focalizados na superfície da lâmina. Assim, em cada abertura obtém-se exatamente a mesma geometria. Os principais problemas desse sistema estão associados à dificuldade em obter-se uma varredura uniforme e precisa e ao fato de que todas as pastilhas geradas têm que ser exatamente iguais, não se permitindo a criação de pastilhas diferentes dentro da lâmina.

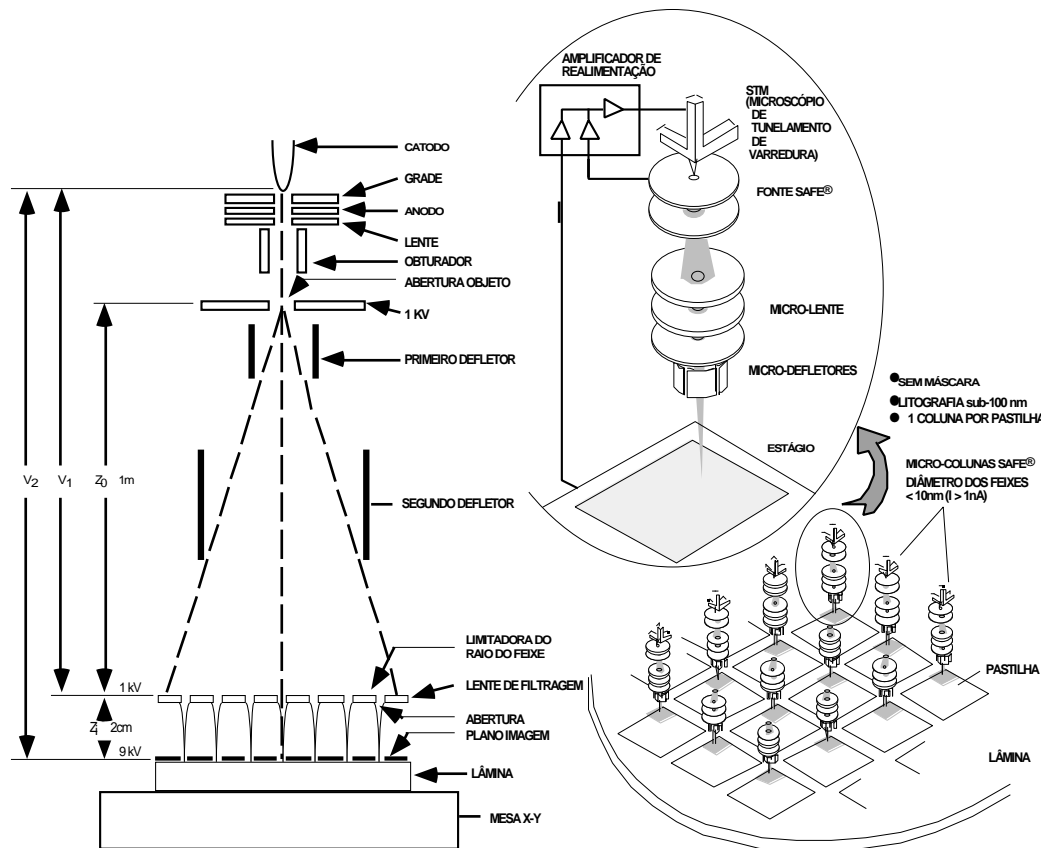


FIG. 1.9 Sistemas de múltiplos feixes (simultâneos): a) tipo olho de mosca (*fly's eye*); b) tipo STM-microlente. (FONTES: I. BRODIE<sup>69</sup> e T. CHANG<sup>70</sup>)

O sistema apresentado na Fig. 1.9b baseia-se<sup>70</sup> em um tipo de microscópio de varredura por tunelamento (*Scanning Tunneling Microscope – STM*) empregando emissão de campo e na utilização de microlentes com dimensões da ordem de milímetros de tal forma que uma matriz desse conjunto STM–Microlente possa ser empregada. É muito importante observar que neste tipo de sistema é possível utilizar-se mais de um feixe por pastilha (a limitação é o tamanho físico do conjunto) já que o controle de cada feixe pode ser feito independentemente. Além disso, um dos fatores limitantes em litografia por feixe de elétrons, a aberração das lentes, é proporcional<sup>71</sup> ao tamanho das lentes e portanto a utilização de microlentes permite a obtenção de alta resolução e intensidade de corrente sem que haja aberração significativa. Com isso, pode-se concluir<sup>70</sup> que resoluções da ordem de 25 nm são perfeitamente possíveis

---

empregando-se litografia de baixa tensão (1kV) e não é necessário fazer-se correções devido a efeitos de proximidade para estruturas de até 100 nm. A produtividade desses sistemas é de 2 a 3 ordens de grandeza maior que a convencional. O único aspecto negativo é que empregando-se esses parâmetros, consegue-se sensibilizar uma camada de resiste de no máximo 10–20 nm de espessura e portanto se faz necessária a utilização de técnicas especiais de revelação do resiste, seja empregando-se resistes multicamadas ou então outros métodos que serão descritos adiante.

#### 1.4.1.3 Litografia por Raios-X

Devido ao comprimento de onda utilizado (na prática em torno de 1 nm) a litografia por raios X não apresenta os problemas de difração e impressão de defeitos orgânicos encontrados em litografia óptica e assim torna-se um grande candidato a tecnologias em torno do quarto de micron<sup>72</sup>. A litografia por raios X convencional emprega um sistema por proximidade<sup>73</sup>, onde uma máscara contendo uma réplica em escala 1:1 das geometrias a serem produzidas é colocada a uma distância da ordem de 10  $\mu\text{m}$ . Produtividades equivalentes a dos sistemas ópticos convencionais são obtidas e resoluções melhores que 100 nm são possíveis<sup>3,74</sup>. Essa tecnologia já demonstrou que possui grande profundidade de foco, que permite obter perfis de resistes excelentes, que tem boa tolerância de processo e boa imunidade ao tipo ou topografia do substrato. Além disso, o sistema de alinhamento é tão bom quanto os melhores sistemas ópticos e a tecnologia de resistes já está disponível<sup>60</sup>. Por essas características ela é tida como provável sucessora da litografia óptica. O único entrave encontrado é que ela baseia-se em máscaras 1:1 e portanto o grau de dificuldade de produção da máscara é extremamente elevado, principalmente se for considerado que ela deve ser isenta de defeitos e que deve ter excelentes qualidades mecânicas para não sofrer alterações com o uso repetido e com variações de temperatura<sup>35,26,38</sup>. Devido a essas características, o custo envolvido é extremamente elevado, como mencionado anteriormente. Logo, litografia por raios X, se exequível, justifica-se apenas para altos volumes de produção<sup>75</sup>. Sugeriu-se a utilização de sistemas de projeção para litografia por raios X<sup>27,76,77,78</sup> (*soft X ray lithography* ou *extended ultraviolet lithography* – EUV) onde se emprega óptica de reflexão (de raios X) e uma máscara reflexiva, basicamente da mesma forma que em litografia óptica. A vantagem desse sistema está na possibilidade de utilizar um fator de redução (assim a máscara não precisa ser uma cópia 1:1 das geometrias), além de empregar uma máscara reflexiva que portanto não necessita ser transparente aos raios X. Por outro lado, projetar, construir e montar os espelhos para raios X necessários nesse sistema são tarefas irrealizáveis até o momento.

### 1.4.2 Melhoria nos Resistes e Técnicas de Cobertura da Lâmina

Se a espessura dos resistes empregados pudesse ser escalada proporcionalmente à redução das dimensões laterais desses dispositivos, o sistema litográfico seria capaz de definir as geometrias necessárias. No entanto, a espessura dos resistes não é ditada apenas pela dimensão dos dispositivos que se deseja fabricar mas também por fatores de rendimento. Um problema muito sério é a densidade de furos (*pinholes*) no filme de resiste. Como mostra a Fig. 1.10, essa densidade é função da espessura do resiste e da limpeza do ambiente. Outro problema é que muitas vezes fabricam-se estruturas com relações de aspecto elevadas, como trincheiras em silício (*silicon trenches*) com 0,25  $\mu\text{m}$  de lado por 1  $\mu\text{m}$  de profundidade. Esse tipo de estrutura só pode ser fabricada empregando-se corrosão por plasma que não possui a mesma seletividade que a corrosão por banho líquido tradicional. Tipicamente, o resiste corrói a uma taxa de cinco a dez vezes maior que o filme que se deseja corroer<sup>79</sup>. Assim, para a fabricação de dispositivos submicrométricos, levando-se em conta os problemas de prevenção de defeitos no filme de resiste e de adequação à etapa de corrosão, considera-se<sup>80</sup> que a espessura total de resiste permanecerá em torno de 1  $\mu\text{m}$  mesmo para tecnologias de 0,25  $\mu\text{m}$ , permitindo-se espessuras de 0,5  $\mu\text{m}$  em casos especiais.

Outro aspecto importante, diretamente ligado à sensibilidade do resiste é que sistemas litográficos de alta resolução empregam fontes de energia de menor densidade que portanto aumentam o tempo de exposição necessário.

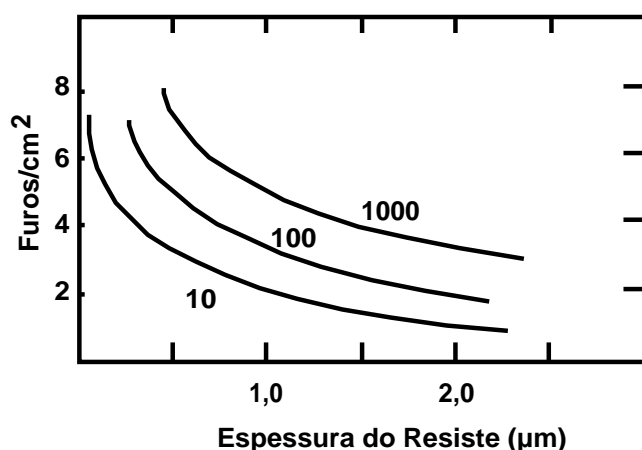


FIG. 1.10 Furos de diâmetro 0,3 $\mu\text{m}$  em resiste recobrendo lâminas de silício para três diferentes classes de sala limpa. (FONTE: W. MOREAU<sup>81</sup>)

Existem três abordagens para a melhoria do desempenho dos resistes: a primeira aborda o problema globalmente, melhorando as

---

características do resiste por meio de novas formulações que vão de encontro às características necessárias; a segunda agrega *seletivamente* ao resiste um composto que funciona como inibidor da corrosão; a terceira soluciona o problema por partes, espalhando duas camadas de resiste (resistes multicamadas – *multi-layer resists*) com propriedades distintas e que se complementam no sentido de atender às exigências de processo.

#### 1.4.2.1 Novas Formulações de Resistes

Os resistes positivos baseados em um composto fotoativo da família das diazoquinonas (DQ) e uma matriz polimérica novolac (N) absorvem energia nas linhas *g*, *h* e *i*, tendo por isso sido utilizados desde meados da década de 70 e provavelmente continuarão sendo os resistes em uso por mais alguns anos<sup>82</sup>. O princípio de operação desse sistema baseia-se na transformação do sensibilizador DQ que após a exposição atua como eficiente solubilizador do novolac em soluções polares (bases). Esses resistes continuam sendo amplamente investigados para melhoria de suas características de contraste, tanto pelo retardamento da dissolução das áreas não expostas como pelo aumento da dissolução das áreas expostas<sup>80</sup>. Além de apresentarem características adequadas aos processos, o custo de introduzir-se uma nova tecnologia ou família de resistes no processo produtivo é elevado. Infelizmente, os resistes DQN convencionais não são adequados às necessidades das tecnologias de 0,5  $\mu\text{m}$  ou menores, pois neste caso costuma-se empregar comprimentos de onda no ultravioleta profundo (DUV) onde as características de absorção do polímero novolac são muito elevadas (fazendo com que apenas a camada de superfície do resiste seja sensibilizada) e onde as fontes de energia disponíveis são menos densas, requerendo componentes fotoativos de grande sensibilidade<sup>83</sup>. A eficiência quântica típica<sup>84</sup> da transformação do sensibilizador DQ é da ordem de 0,2–0,3. Essa eficiência quântica, mesmo se fosse 1, resultaria em uma melhoria na sensibilidade de aproximadamente 4 vezes, o que é insuficiente face aos novos processos. Assim, independentemente de qual tecnologia venha a suceder a litografia óptica DUV, quando esta tiver atingido o seu limite, novos resistes e processos serão necessários.

Muitas formulações de resistes são capazes de definir estruturas de 0,25  $\mu\text{m}$  em uma camada de 1  $\mu\text{m}$  de espessura, mas não apresentam a necessária resistência à corrosão para a efetivação dos passos de produção subsequentes. Considera-se que uma resistência adequada à etapa de corrosão é aquela apresentada pelos resistes baseados no sistema DQN, embora apresentem resolução limitada nas formulações empregadas atualmente. Um exemplo característico

---

desse problema é o PMMA (polimetilmetacrilato) que ao longo de 30 anos tem sido responsável por recordes e inovações em litografia<sup>85</sup>, sendo empregado em litografia DUV<sup>86</sup>, por feixe de elétrons<sup>85</sup>, por feixe de íons<sup>87</sup> e por raios X<sup>3</sup> devido a sua resolução mas que tem pouca utilidade prática devido a sua baixa resistência à corrosão por plasma. Assim, muitas formulações são apresentadas em literatura que apresentam apenas interesse acadêmico. Portanto, mesmo que a resolução de determinado resiste seja adequada para a fabricação de dispositivos submicrométricos deve-se verificar outras atribuições também importantes, notadamente sensibilidade, perfil adequado e resistência à corrosão.

Os resistes de tom negativo convencionais, por outro lado, apresentam um problema distinto, o de inchamento<sup>84</sup> (*swelling*) das estruturas após a revelação. Este fenômeno limita sua utilização prática, não sendo adequados para a litografia submicrométrica.

#### 1.4.2.1.1 Resistes Amplificados Quimicamente

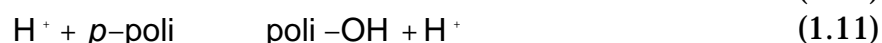
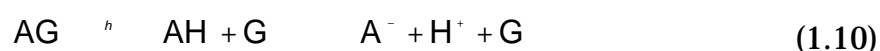
Para suplantarmos o problema de sensibilidade, ITO e WILLSON<sup>84</sup> propuseram a utilização de sistemas baseados em amplificação química semelhante aos sistemas de emulsão fotográfica baseados em haletos de prata. Nesse tipo de sistema, um único evento de radiação é utilizado como catalisador de uma série de reações químicas, não sendo consumido por essas reações. Esse sistema é de grande interesse em litografia por raios X, por feixe de elétrons e DUV, principalmente porque aumenta a sensibilidade dos resistes (todos esses sistemas empregam fontes de menor energia e portanto têm problemas de produtividade) e porque possibilitam o uso de polímeros com menor coeficiente de absorção nesses comprimentos de onda (que permitem sensibilizar resistes mais espessos e obter perfis mais adequados).

Tradicionalmente os resistes positivos apresentam maior resolução que os resistes negativos devido aos mecanismos de transformação envolvidos e por isso são os resistes escolhidos em processos de alta resolução. A principal limitação dos resistes negativos é que eles baseiam-se no mecanismo de formação de cadeias, isto é, as áreas expostas fazem ligações cruzadas (*cross-links*) que tornam essas regiões insolúveis no solvente revelador<sup>84</sup>. Essa insolubilização no entanto não impede uma forte interação entre essa região e o solvente, levando ao fenômeno de inchamento (*swelling*) que resulta na distorção dos traçados obtidos. É praticamente impossível<sup>84</sup> evitar o fenômeno de inchamento em resistes que funcionam através de ligações cruzadas pois o mecanismo de insolubilização é baseado em uma diferenciação de propriedades físicas das

regiões expostas e não expostas, sendo que a natureza química de ambas permanece a mesma. Assim, as mesmas forças que atuam na dissolução das áreas não expostas atuam no interior das regiões expostas. A proposta desses pesquisadores foi empregar resistes baseados no mecanismo de diferenciação de solubilidade resultante de alterações químicas e não físicas, onde a identificação de solventes que atuem apenas nas regiões não expostas, sem afetar as regiões expostas, torna-se mais fácil. Em particular, esses sistemas têm uma característica muito elegante que é a possibilidade de revelar a imagem de forma positiva ou negativa, dependendo apenas do tipo de solvente escolhido.

A sensibilidade acentuada dos resistes do tipo amplificado quimicamente provém da regeneração do ácido responsável pela transformação química do polímero que se torna disponível para reações adicionais. Essa taxa de regeneração é altamente dependente da temperatura em que se encontra a lâmina após a exposição do resiste e encontra-se na faixa de 800 – 1200 regenerações para resistes com apelo comercial<sup>82</sup>. Embora resistes amplificados quimicamente possam ser do tipo que forma a imagem latente à temperatura ambiente ou mesmo auto-revelável (onde a imagem latente final do resiste está presente logo após a exposição), por uma questão de reprodutibilidade do processo é preferível que a imagem latente forme-se apenas quando a lâmina é submetida a aquecimento a temperaturas na faixa de 60°C – 150°C.

O processo de amplificação química é apresentado abaixo<sup>82</sup>:



onde AG é o gerador de ácido sensível à radiação, H<sup>+</sup> é o próton que é regenerado depois de cada reação de desproteção ( exp. 1.11 ), p-poli é o polímero protegido e poli-OH é o polímero-produto solúvel.

A molécula de AG é convertida em um ácido forte (AH) logo após a absorção de um fóton (*h*) a uma taxa elevada, que depende da eficiência quântica do AG e do fluxo da radiação incidente (exp. 1.10). Aquecendo-se ( ) o filme a uma temperatura adequada, libera-se o próton (H<sup>+</sup>) que por sua vez efetua a reação de desproteção (exp. 1.11) desejada a uma taxa constante. Essa taxa é função da concentração de prótons [H<sup>+</sup>], da temperatura e mais importante, da taxa de difusão desse próton na matriz polimérica. Por sua vez, a taxa de difusão do ácido (próton) depende da temperatura e da polaridade da matriz polimérica. Na própria reação (exp. 1.11) o próton H<sup>+</sup> é regenerado e continua disponível para reações subseqüentes, daí a natureza de amplificação do sistema. Por fim, devido à natureza química da transformação, pode-se

escolher um solvente adequado que atue apenas sobre a região exposta ou sobre a região não exposta, como mostra a Fig. 1.11.

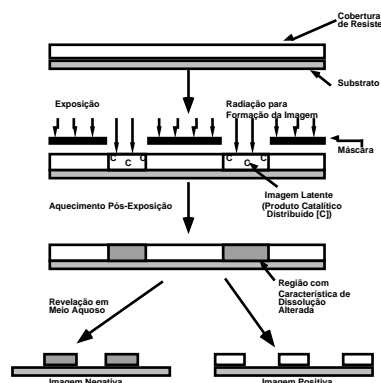


FIG. 1.11 Princípio de operação de um resiste amplificado quimicamente. Dependendo do tipo de revelador a imagem obtida pode ser positiva ou negativa. (FONTE: C. WILLSON<sup>84</sup>)

Outro desdobramento interessante desse trabalho é que fica clara a distinção das várias funções de um resiste. Assim, o projetista molecular pode trabalhar separadamente em cada componente do resiste, otimizando o AG para ter alta eficiência quântica, o ácido AH para ter alto grau de catalização (alta sensibilidade) e a matriz polimérica para ter boas características de processo. Assim, é muito comum encontrarmos resistes amplificados quimicamente que são fabricados a partir de três componentes e não dois como é usual (sistema DQN)<sup>83</sup>.

#### 1.4.2.2 Resistes Multicamadas

Não é apenas de modificações na formulação do resiste que se obtém melhoria no desempenho do processo. Se fossem empregados resistes de pequena espessura (abaixo de  $0,5\mu\text{m}$ ) seria possível obter alta resolução. No entanto, devido aos problemas de topografia e refletividade da lâmina, aliados ao problema de resistência à corrosão, isso é praticamente impossível. Empregando-se adequadamente uma composição de filmes de resistes pode-se atingir esse objetivo. A combinação de uma camada espessa de filme para recobrir toda a lâmina e suavizar a topografia e sobre essa camada um filme fino com as características de resolução desejadas, divide o problema e aumenta as chances de sucesso. Esse tipo de proposta é genericamente chamada de processos multicamadas de resistes (*multi-layer resists* – MLR)<sup>88</sup>. Como somente a camada superior é sensibilizada, a DOF é muito menos crítica. Além disso, pode-se empregar revelação líquida tradicional já que o filme é fino. A seguir deve-se transferir a imagem formada na camada superior para a camada inferior por



---

meio de revelação a seco (por plasma), garantindo um perfil anisotrópico para o filme.

A forma de realizar o processo MLR na prática varia muito, sendo que em alguns casos ele é complicado pela introdução de uma terceira camada intermediária com a finalidade de melhor isolar as duas camadas originais de resiste seja por problemas de miscigenação entre elas, seja para ter-se uma máscara mais efetiva para a corrosão quando da transferência do traçado da camada superior para a inferior<sup>89</sup>. Embora este procedimento obtenha resultados melhores, a complexidade adicional é muito grande, podendo facilmente duplicar o número de etapas e o tempo de processamento, razão pela qual se evita a sua utilização em processos de produção, tendo no entanto boa aceitação em pesquisa.

Como o processo tripla camada é muito complexo e oneroso, tenta-se reduzir o número de etapas e solucionar os problemas do processo dupla camada (principalmente resistência à corrosão) empregando-se como camada superior um resiste que contenha acima de 7% MW de silício e que assim se comporte adequadamente durante a etapa de transferência dos traçados para a camada inferior. O sistema de dupla camada onde a camada superior é ao mesmo tempo sensível à radiação e resistente ao plasma é tido atualmente como a técnica mais promissora para tornar o processo multicamadas viável, pois adiciona poucas etapas e apresenta boa confiabilidade<sup>90,91</sup>.

#### *1.4.2.3 Agregação Seletiva de Inibidores da Corrosão*

##### *1.4.2.3.1 Resistes Reveláveis a Seco*

Se um resiste apresentar diferença nas taxas de corrosão por plasma de áreas expostas para áreas não expostas, a própria corrosão por plasma pode ser utilizada para revelar o resiste. A idéia fundamental é incorporar compostos voláteis contendo silício ou monômeros aromáticos (ambos são corroídos lentamente em corrosão por plasma de O<sub>2</sub>) na formulação do resiste e fazer com que ocorra uma copolimerização desses compostos nas regiões expostas<sup>92</sup>. A seguir, aquecendo-se a amostra, os monômeros ou compostos de silício das regiões não expostas são volatilizados e durante a revelação a seco subsequente estas áreas são reveladas, como mostra a Fig. 1.12.

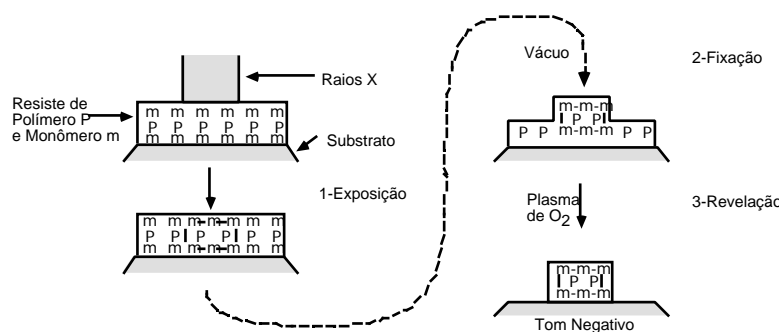


FIG. 1.12 Processo de litografia empregando resiste revelável a seco. (FONTE: G. TAYLOR<sup>93</sup>)

Embora de enorme potencialidade, no momento esses processos apresentam problemas devido ao afinamento excessivo (em torno de 40%) do resiste durante a revelação a seco e devido às doses de exposição extremamente elevadas normalmente empregadas<sup>94</sup>.

#### 1.4.2.3.2 Técnicas de Imagem na Superfície

Uma outra forma para se obter alta resolução é por meio das técnicas de imagem na superfície<sup>80,95</sup> (*top surface imaging techniques*). Neste caso emprega-se apenas uma camada de resiste que é exposta da forma convencional. A seguir, por meio de uma etapa adicional, incorpora-se seletivamente, *i.e.*, incorpora-se ou nas regiões expostas ou nas regiões não expostas, um composto capaz de inibir a corrosão a seco daquela região. Este composto incorpora-se idealmente apenas nos 20-30nm da superfície superior do resiste. Assim, obtém-se o desempenho de um processo dupla camada empregando-se apenas uma camada de resiste.

A etapa adicional que é capaz de inibir a corrosão a seco, é conhecida como etapa de sililação (*silylation*) pois procura incorporar especificamente silício, embora outros elementos tais como In<sup>96</sup> ou Ti<sup>97</sup> possam ser utilizadas. A forma de incorporação varia, podendo ser realizada diretamente por implantação<sup>96</sup>, por fase gasosa<sup>95,98</sup> ou por fase líquida<sup>99,100</sup>.

Sem dúvida alguma, dentre as técnicas de imagem na superfície, a mais estudada e conhecida é a técnica DESIRE (*diffusion enhanced silylated resist process*) introduzida por F. COOPMANS e B. ROLAND<sup>101</sup>. Nesta técnica, apresentada na Fig. 1.13, a lâmina é recoberta com um resiste baseado em DQN especialmente desenvolvido para corrosão a seco (Plasmask<sup>®</sup>) que pode ser exposto em linha-g, linha-i ou DUV.

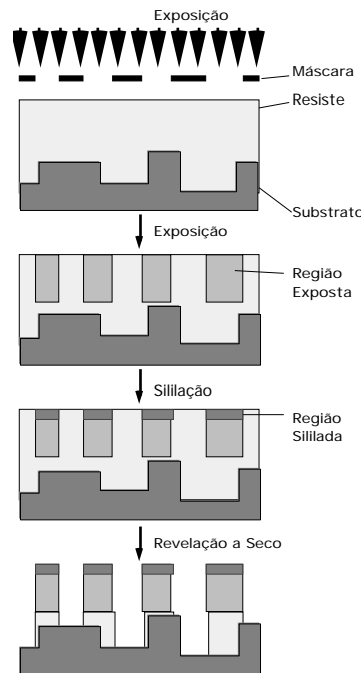


FIG. 1.13 Seqüência de etapas do processo DESIRE. (FONTE: F. COOPMANS<sup>101</sup>)

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

---

# Bibliografia

1. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 30.
2. SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL ASSOCIATION Processes of the Future. **Solid State Technology**. v.38, n.2, pp.42-6, feb 1995.
3. PEASE, R.F.W. Nanolithography and its prospects as a manufacturing technology. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B10, n.1, pp.278-85, Jan./Feb. 1992.
4. EIGLER, D.M. AND SCHWEIZER, E.K. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. **Nature**. v.344, pp.524-6, 5 april 1990.
5. VENEKLASEN, L. Electron Beam Patterning and Direct Write. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 413.
6. VENEKLASEN, L. Electron Beam Patterning and Direct Write. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 367.
7. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 23.
8. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 27.
9. VENEKLASEN, L. Electron Beam Patterning and Direct Write. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 368.
10. WOLF, S. AND TAUBER, R.N. **Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology**. Lattice Press, 1987. v.1, p.473.
11. GLENDINNING, W.B. AND CERRINA, F. X-Ray Lithography. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 445.
12. POTENZA, G. Registration accuracy in submicron devices. **Proc. of Microelectronic Eng.**. 1990.
13. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.397.
14. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.400.
15. WOLF, S. AND TAUBER, R.N. **Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology**. Lattice Press, 1987. v.1, p.476.
16. VOLLENBROEK, F.A. *Microelectronic Lithography*. Escola Politécnica da USP, julho, 1989.
17. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.371.
18. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.373.

- 
19. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 32.
  20. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.276.
  21. BLEWER, R. **Congress on Metalization**. Campinas, Brasil. 1994.
  22. BURGGRAAF, P. X-Ray Lithography and Mask Technology. **Semiconductor International**. v.8, n.4, pp.92-9, Apr. 1985.
  23. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 29.
  24. WOLF, S. AND TAUBER, R.N. **Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology**. Lattice Press, 1987. v.1, p.468.
  25. HOHN, F.J. Electron Beam Lithography-Tools and Applications. **Japanese Journal of Applied Physics**. v.30, n.11B, pp.3088-92, Nov. 1991.
  26. POWELL, M.M. IEEE Workshop on Submicrometer Lithography. **Solid State Technology**. v.34, n.12, pp.54-5, Dec. 1991.
  27. BURGGRAAF, P. AMD chief scientist outlines 'tough' lithography intricacies for the '90s. **Semiconductor International**. v.14, n.5, p.46, Apr. 1991.
  28. HORN, M.W. Antireflection Layers and Planarization for Microlithography. **Solid State Technology**. v.34, n.11, pp.57-62, Nov. 1991.
  29. SINGER, P. Chemical-mechanical Polishing: A New Focus on Consumables. **Semiconductor International**. v.17, n.2, pp.48-52, Feb. 1994.
  30. DENBOER, A. Inside Today's Leading Edge Microprocessors. **Semiconductor International**. v.17, n.2, pp.64-6, Feb. 1994.
  31. BURGGRAAF, P. Stepper-track Integration: Solving the Problems. **Semiconductor International**. v.15, n.9, pp.30-3, Aug. 1992.
  32. BURGGRAAF, P. Illumination: Aperture Methods Give I-line 64Mb DRAM Capabilities. **Semiconductor International**. v.15, n.11, pp.30, Oct. 1992.
  33. WALDO, W. Techniques and Tools for Optical Lithography. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 273.
  34. WALDO, W. Techniques and Tools for Optical Lithography. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 248.
  35. BURGGRAAF, P. Lithography's Leading Edge, Part 2: I-line and Beyond. **Semiconductor International**. pp.52-6, Mar. 1992.
  36. PETERS, D.W. Examining Competitive Submicron Lithography. **Semiconductor International**. v.11, n.2, pp.96-100, Feb. 1988.
  37. WORLD, S. In Pursuit of 0.35 Micron Process Technology. **Semiconductor International**. v.16, n.8, pp.184-6, July 1993.
  38. OKAZAKI, S. Lithographic Technology for Future ULSIs. **Solid State Technology**. v.34, n.11, pp.77-82, Nov. 1991.
  39. FUKUDA, H.; IMAI, A.; TERASAWA, T.; AND OKAZAKI, S. New Approach to Resolution Limit and Advanced Image Formation Techniques in Optical Lithography. **IEEE Transactions on Electron Devices**. v.ED-38, n.1, pp.67-75, Jan. 1991.

- 
40. CROMER, JR, E.G. Mask aligners and steppers for precision microlithography. **Solid State Technology**. v.36, n.4, pp.23-4, Apr. 1993.
  41. LEVENSON, M.D.; VISWANATHAN, N.S.; AND SIMPSON, R.A. Improving Resolution in Photolithography with a Phase-Shifting Mask. **IEEE Transactions on Electron Devices**. v.ED-29, n.12, pp.1828-36, Dec. 1982.
  42. WATANABE, H. AND TODOKORO, Y. Phase-shifting lithography: Maskmaking and its application. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B11, n.6, pp.2669-74, Nov./Dec. 1993.
  43. VON BÜNEAU, R.; OWEN, G.; AND PEASE, R.F.W. Depth of focus enhancements in optical lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B10, n.6, pp.3047-54, Nov./Dec. 1992.
  44. KAMON, K.; MIYAMOTO, T.; MYOI, Y.; NAGATA, H.; AND TANAKA, M. Photolithography system using modified illumination. **Jap. Journal of Applied Physics**. v.32, n.1-1A, pp.239-43, Jan. 1993.
  45. LEVENSON, M.D. Extending Optical Lithography to the Gigabit Era. **Solid State Technology**. v.38, n.2, pp.57-66, Feb. 1995.
  46. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 16.
  47. GENTILI, M.; GRELLA, L.; LUCIANI, L.; MASTROGIACOMO, L.; AND SCOPA, L. Electron beam lithography for fabrication of 0.1 $\mu$ m scale structures in thick single level resist. **Proceedings of Microelectronic Engineering**. v.14, pp.159-71, 1991.
  48. YEN, A.; PARTLO, W.N.; MCCLEARY, R.W.; AND TIPTON, M.C. 0.25 $\mu$ m Lithography Using a Deep-UV Stepper with Annular Illumination. **Proc. of Microelectronic Engineering**. v.21, pp.37-42, 1993.
  49. OWEN, G. Methods for proximity effect correction in electron lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B8, n.6, pp.1889-92, Nov./Dec. 1990.
  50. OTTO, O.W. AND GRIFFITH, A.K. Proximity correction on the AEBLE-150. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B, n.6, pp.443-447, Jan./Feb. 1988.
  51. BOJKO, R.J. AND HUGHES, B.J. Quantitative lithographic performance of proximity correction for electron beam lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B8, n.6, pp.1909-13, Nov./Dec. 1990.
  52. YAMASAKI, S.; ABE, T.; YOSHIKAWA, R.; ITOH, M.; SHIGEMITSU, F.; AND TAKIGAWA, T. Performance Evaluation of Representative Figure Method for Proximity Effect Correction. **Japanese Journal of Applied Physics**. v.30, n.11B, pp.3103-7, Nov. 1991.
  53. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 17.
  54. NAKAYAMA, Y.; OKAZAKI, S.; SAITOU, N.; AND WAKABAYASHI, H. Electron-beam cell projection lithography: A new high-throughput electron-beam direct-writing technology using a specially tailored Si aperture. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B8, n.6, pp.1836-40, Nov./Dec. 1990.
  55. LIDDLE, J.A.; HUGGINS, H.A.; BERGER, S.D.; GIBSON, J.M.; WEBER, G.; KOLA, R.; AND JURGENSEN, C.W. Mask fabrication for projection electron-beam lithography incorporating the SCALPEL technique. **J. of Vac. Science and Technology**. v.B9, n.6, pp.3000-4, Nov./Dec. 1991.
  56. MURR, L.E. **Electron Optical Applications in Materials Science**. McGraw-Hill Book Company, 1970. p.98.
  57. MURR, L.E. **Electron Optical Applications in Materials Science**. McGraw-Hill Book Company, 1970. p.6.
  58. VENEKLASEN, L. Electron Beam Patterning and Direct Write. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 428.
-

- 
59. WOLF, S. AND TAUBER, R.N. **Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology**. Lattice Press, 1987. v.1, p.596.
  60. BROERS, A.N. **VLSI Lithography**. CEI-EUROPE ELSEVIER, 1991.
  61. MURR, L.E. **Electron Optical Applications in Materials Science**. McGraw-Hill Book Company, 1970. p.48.
  62. VENEKLASEN, L. Electron Beam Patterning and Direct Write. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 381.
  63. PFEIFFER, H.C. Variable spot shaping for electron-beam lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.15, n.3, pp.887-90, May/June 1978.
  64. ITOH, H.; TODOKORO, H.; SOHDA, Y.; NAKAYAMA, Y.; AND SAITOU, N. Cell projection column for high speed electron-beam lithography system. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B10, n.6, pp.2799-803, Nov./Dec. 1992.
  65. BERGER, S.D.; GIBSON, J.M.; CAMARDA, R.M.; FARROW, R.C.; HUGGINS, H.A.; KRAUS, J.S.; AND LIDDLE, J.A. Projection electron-beam lithography: A new approach. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B9, n.6, pp.2996-9, Nov./Dec. 1991.
  66. NEHMIZ, P.; ZAPKA, W.; BEHRINGER, U.; KALLMEYER, M.; AND BOHLEN, H. Electron beam proximity printing: Complementary-mask and level-to-level overlay with high accuracy. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B3, n.1, pp.136-9, Jan./Feb. 1985.
  67. WARD, R.; FRANKLIN, A.R.; LEWIN, I.H.; GOULD, P.A.; AND PLUMMER, M.J. A 1:1 electron stepper. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B4, n.1, pp.89-93, Jan./Feb. 1986.
  68. SCOTT, J.P. Recent progress on the electron image projector. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.15, n.3, pp.1016-21, May/June 1978.
  69. BRODIE, I.; WESTERBERG, E.R.; CRONE, D.R.; MURAY, J.J.; WILLIAMS, N.; AND GASIOREK, L. A Multiple-Electron-Beam Exposure System for High-Throughput, Direct-Write Submicrometer Lithography. **IEEE Transactions on Electron Devices**. v.ED-28, n.11, pp.1422-8, Nov. 1981.
  70. CHANG, T.H.P.; KERN, D.P.; AND MURAY, L.P. Arrayed miniature electron beam columns for high throughput sub-100 nm lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B10, n.6, pp.2743-8, Nov./Dec. 1992.
  71. MURAY, L.P.; STAUFER, U.; BASSOUS, E.; KERN, D.P.; AND CHANG, T.H.P. Experimental evaluation of a scanning tunneling microscope-microlens system. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B9, n.6, pp.2955-61, Nov./Dec. 1991.
  72. BLAIS, P. AND MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 13.
  73. GLENDINNING, W.B. AND CERRINA, F. X-Ray Lithography. In: GLENDINNING, W.B. AND HELBERT, J.N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**. Noyes Publications, 1991. Cap. 1, p. 441.
  74. CHU, W.; SMITH, H.I.; RISHTON, S.A.; KERN, D.P.; AND SCHATTENBURG, M.L. Fabrication of 50nm line-and-space x-ray masks in thick Au using a 50 keV electron beam system. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B10, n.1, pp.118-21, Jan./Feb. 1992.
  75. FLEMING, D. Prospects for x-ray lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B10, n.6, pp.2511-5, Nov./Dec. 1992.
  76. CEGLIO, N.M.; HAWRYLUK, A.M.; STEARNS, D.G.; GAINES, D.P.; ROSEN, R.S.; AND VERNON, S.P. Soft x-ray projection lithography. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B8, n.6, pp.1325-8, Nov./Dec. 1990.

- 
77. BJORKHOLM, J.E.; BOKOR, J.; AND , Reduction imaging at 14 nm using multilayer-coated optics: Printing of features smaller than 0.1 $\mu$ m. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B8, n.6, pp.1509-13, Nov./Dec. 1990.
  78. WHITE, D.L.; BJORKHOLM, J.E.; BOKOR, J.; EICHNER, L.; FREEMAN, R.R.; JEWELL, T.E.; MANSFIELD, W.M.; MACDOWELL, A.A.; SZETO, L.H.; TAYLOR, D.W.; TENNANT, D.M.; WASKIEWICZ, W.K.; WINDT, D.L.; AND , O.R.W.I. Soft X-Ray Projection Lithography. **Solid State Technology**. v.34, n.7, pp.37-42, July 1991.
  79. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.733.
  80. MOREAU, W.M. The survival of single film resists. **ukn**. pp.1-14B, 1990.
  81. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.318.
  82. REICHMANIS, E. AND THOMPSON, L.F. Chemistry and process for deep-UV resists. **Proceedings of Microelectronic Engineering**. v.14, pp.215-26, 1991.
  83. LAMOLA, A.A.; SZMANDA, C.R.; AND THACKERAY, J.W. Chemically Amplified Resists. **Solid State Technology**. v.34, n.8, pp.53-60, Aug. 1991.
  84. WILLSON, C.G.; ITO, H.; FRÉCHET, J.M.J.; TESSIER, T.G.; AND HOULIHAN, F.M. Approaches to the Design of Radiation-Sensitive Polymeric Imaging Systems with Improved Sensitivity and Resolution. **Journal of The Electrochemical Society**. v.133, n.1, pp.181-7, Jan. 1986.
  85. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.117.
  86. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.379.
  87. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.451.
  88. VOLLENBROEK, F.A. AND SPIERTZ, E.J. Photoresist Systems for Microlithography. In: **Advances in Polymer Science 84**. Springer-Verlag, 1988.
  89. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.597.
  90. YAMASHITA, Y. AND KAZIWARA, M. Novel Si-Containing Resist, SCMR, for EB Lithography. **Journal of The Electrochemical Society**. v.137, n.10, pp.3253-7, Oct. 1990.
  91. GRANGER, D.D.; MILLER, L.J.; AND LEWIS, M.M. New silicon-containing negative resists. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B6, n.1, pp.370-4, Jan./Feb. 1988.
  92. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.515.
  93. TAYLOR, G.N. NewNew. **Journal of The Electrochemical Society**. v.127, n.2, pp.2668, Feb. 1980.
  94. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.520.
  95. TAYLOR, G.N.; STILLWAGON, L.E.; AND VENKATESAN, T. Gas-Phase-Functionalized Plasma-Developed Resists: Initial Concepts and Results for Electron-Beam Exposure. **Journal of The Electrochemical Society**. v.131, n.7, pp.1658-64, July 1984.
  96. LIN, B.J. Multilayer Resist Systems and Processing. **Solid State Technology**. v.26, n.5, pp.105-112, May 1983.
  97. MOREAU, W.M. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. Plenum Publishing Corporation, 1987. (Microdevices), p.134.



- 
98. COOPMANS, F. Resist Overview. **Proceedings of Microelectronic Engineering**. v.6, pp.369-80, 1987.
  99. SHAW, J.M.; HATZAKIS, M.; BABICH, E.D.; PARASZCZAK, J.R.; WITMAN, D.F.; AND STEWART, K.J. A simplified silylation process. **Journal of Vacuum Science and Technology**. v.B7, n.6, pp.1709-16, Nov./Dec. 1989.
  100. BAIK, K.H.; VAN DEN HOVE, L.; AND ROLAND, B. A comparative study between gas and liquid phase silylation for the DESIRE process. **Proceedings of Microelectronic Engineering**. v.17, pp.69-74, 1992.
  101. COOPMANS, F. AND ROLAND, B. DESIRE: A New Route to Submicron Optical Lithography. **Solid State Technology**. v.30, n.6, pp.93-9, June 1987.
  102. BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; AND HUNTER, J.S. **Statistics for Experimenters**. John Wiley & Sons, 1978. (Probability and Mathematical Statistics).
  103. BAIK, K.H.; JONCKHEERE, R.; SEABRA A.C.; AND VAN DEN HOVE, L. Surface Imaging Technique and Dry Development for E-Beam Lithography. **Proceedings of Microelectronic Engineering**. v.17, pp.269-73, 1991.
  104. OP DE BEECK, M. AND VAN DEN HOVE, L. Silylation of novolac based resists: Influence of deep-ultraviolet induced crosslinking. **javstb**. v.10, n.2, pp.701-14, Mar./Apr. 1992.