

# **Nanoestruturas produzidas por litografia por feixe de elétrons utilizando o sistema de microscopia eletrônica por varredura TESCAN MIRA3**

**Gabriela Cerqueira Gomes (CTI) gcgomes@cti.gov.br**

## **Resumo**

*O desenvolvimento de processos em litografia com feixe de elétrons exige, dentre outros, o conhecimento dos fenômenos que estão relacionados direta ou indiretamente na resolução final das estruturas fabricadas. Os parâmetros fundamentais em litografia são aqueles cujos efeitos estão associados à interação do feixe com o resiste e o substrato, como o tipo e a espessura do resiste, tipo do substrato, dose de energia e a geração de elétrons secundários e retroespalhados. Neste trabalho, foram estudados os efeitos fundamentais de escrita com feixe de elétrons a energias de até 30 kV para o desenvolvimento de metodologias na fabricação de nanoestruturas com alta resolução. Para obter estratégias eficientes na produção de estruturas com alta resolução a baixas energias foram realizadas simulações a fim de estudar o compromisso entre os diversos parâmetros envolvidos na interação do feixe com o resiste e o substrato. Para litografia com alta voltagem, um layout com matriz de single pixel lines foi projetado em DrawBeam, com dose variando de 10.000  $\mu\text{C}/\text{cm}$  a 100.000  $\mu\text{C}/\text{cm}$ . Os resultados experimentais mostraram que linhas com largura de 20 nm podem ser produzidas sem acumulação de varredura usando alta energia e baixa corrente do feixe de elétrons.*

*Palavras-chave: Litografia por feixe de elétrons, DrawBeam software, Nanoestruturas.*

## **1. Introdução**

O mercado de fotônica em silício tem previsão de crescimento a uma taxa anual composta (Compound Annual Growth Rate) de 23,4% até 2025, conforme o relatório ‘Mercado de fotônica em silício com impacto COVID-19 – Previsão Global para 2025’. Esse crescimento é acelerado pela atual demanda por tecnologia de fotônica em silício integrada com processamento CMOS em diversas áreas e aplicações emergentes [SEMICONDUCTOR TODAY, 2020].

A litografia por feixe de elétrons é uma técnica fundamental de fabricação, que permite não apenas a escrita direta de estruturas em unidades de nanômetros, como também a fabricação de máscaras para produção por litografia óptica em larga escala. As principais características da técnica incluem a alta resolução, sensibilidade e densidade de padrões. Estas características estão relacionadas entre si de forma complexa, e os fatores determinantes são a qualidade da óptica eletrônica, as características do resiste, substrato e revelador, como também as condições do processo (energia do feixe, dose, tempo e temperatura de revelação) [CUI, 2017]. Em litografia por feixe de elétrons, a química da exposição é desencadeada pelos efeitos dos elétrons primários e elétrons secundários. A interação do feixe de elétrons primários ao incidir na camada de resiste gera dois tipos de eventos de espalhamento, o

espalhamento direto (*forward scattering*), onde o elétron perde energia durante as colisões até ser absorvido por um átomo no interior do resiste, e o retroespalhamento (*backscattering*), causado por elétrons que voltam para a superfície e escapam da amostra. O fenômeno de espalhamento é dependente, dentre outros fatores, da voltagem aplicada [MOHAMMAD, 2012].

A condição de litografia a baixas voltagens diminui a probabilidade de efeitos indesejados que geralmente ocorrem à alta voltagem do feixe. Um exemplo é o efeito de proximidade, quando uma parcela de elétrons retroespalhados é gerada na interface entre o resiste e substrato e interage com moléculas do resiste localizadas a até 10  $\mu\text{m}$  de distância radial a partir da entrada do feixe no resiste. Outra vantagem de escrita a baixas energias é a eficiência do processo, pois uma maior parcela da energia do feixe primário será depositada na camada de resiste, e apenas pequena parcela da energia interage com o substrato. Por outro lado, a baixas voltagens ocorre maior alargamento do diâmetro do feixe primário e diminuição na profundidade de penetração. O espalhamento direto é, por vezes, apontado como uma das desvantagens de litografia a baixas voltagens, pois se torna um desafio obter uniformidade no eixo transversal ao longo da espessura do resiste. Outros fatores dominantes nesse regime são as aberrações cromáticas e a maior dificuldade no alinhamento do feixe devido à menor estabilidade do feixe e brilho [GOLDSTEIN, 2003]. No entanto, é possível fazer uso do efeito de espalhamento eletrônico do feixe incidente e da variação espacial na deposição de energia para expor estruturas com profundidade tridimensional.

De forma geral, o planejamento de estratégias de exposição exige o conhecimento dos efeitos de dispersão dos elétrons envolvidos no processo de interação do feixe com o resiste e o substrato. Esses efeitos podem ser estimados por simulações Monte Carlo, que emprega as distribuições estatísticas de difusão de elétrons e considera as expressões de ângulos de espalhamento e de taxa de perda de energia em função da distância percorrida pelos elétrons na amostra [CASINO v2.42]. A análise das propriedades que controlam o volume de interação e a consequente distribuição de sinais é importante para desenvolver estratégias eficientes que nos permitam atender demandas emergentes em aplicações inovadoras. Portanto, este trabalho analisa o compromisso entre os principais parâmetros que contribuem para alta resolução de estruturas produzidas a baixa voltagem e alta voltagem do feixe de elétrons.

## 2. Metodologia

O efeito de dispersão dos elétrons em interação com a amostra pode ser estimado por simulações Monte Carlo. As simulações do volume de interação do feixe de elétrons em função da energia foram produzidas com software Casino [CASINO v2.42]. Para cada voltagem de aceleração aplicada, podemos obter valores de distribuição radial de sinais e profundidade de penetração como uma estimativa do alcance dos elétrons na espessura da amostra.

Para planejamento dos processos de litografia, a geração dos layouts e padrões geométricos foi realizada em DrawBeam, um software dedicado que está disponível no microscópio eletrônico de varredura SEM-FEG MIRA3 TESCAN do CTI. Diferentemente dos comerciais, esse sistema com software DrawBeam não permite o uso de um único arquivo de entrada

onde são definidos os parâmetros de exposição. Em vez disso, os parâmetros são selecionados pelo usuário em uma sequência de operações.

Foram usados substratos de Si 10×10 mm. Após corte dos substratos, o tratamento das amostras foi realizado na seguinte sequência: limpeza dos substratos com acetona, isopropanol (IPA) e secagem com N<sub>2</sub>, deposição de resiste por *spin coater* por 45s, *soft bake* de 180°C por 60s. Foi usado resiste polymethylmethacrylate (PMMA) A6 495K diluído em anisol a 2% para espessura de 65 nm. Para revelação, foi usada solução de *methyl isobutyl ketone* (MIBK) e IPA na proporção MIBK:IPA 1:3 por 60s a 25°C, seguido por *stopper* (IPA) por 20s, lavagem em IPA, secagem com N<sub>2</sub> e *hard bake* de 100°C por 60s. Os padrões foram produzidos no sistema SEM-FEG MIRA3 do CTI com corrente de 47 pA e voltagens de 5 kV e 30 kV.

Medidas de Microscopia por Força Atômica foram realizadas para inspeção e extração dos valores de largura das linhas. A metodologia de tratamento dos dados foi realizada com software Gwyddion v2.47. A partir da análise por imagem 2D, foram traçados perfis de linha para melhor definição dos limites nas extremidades. Os valores de largura e profundidade das linhas foram extraídos a fim de obter a taxa de largura das linhas em função da dose aplicada.

### 3. Resultados e Discussão

Neste trabalho, foram analisados os efeitos de interação do feixe de elétrons nas amostras produzidas com 65 nm de PMMA sobre substrato de Si. A Figura 1 apresenta simulações em seção transversal do volume de interação para energias do feixe incidente de 1 kV a 30 kV. A linha tracejada representa a interface entre resiste e substrato. Linhas azuis representam as trajetórias dos elétrons com espalhamento direto, e as linhas vermelhas representam as trajetórias de elétrons retroespalhados.

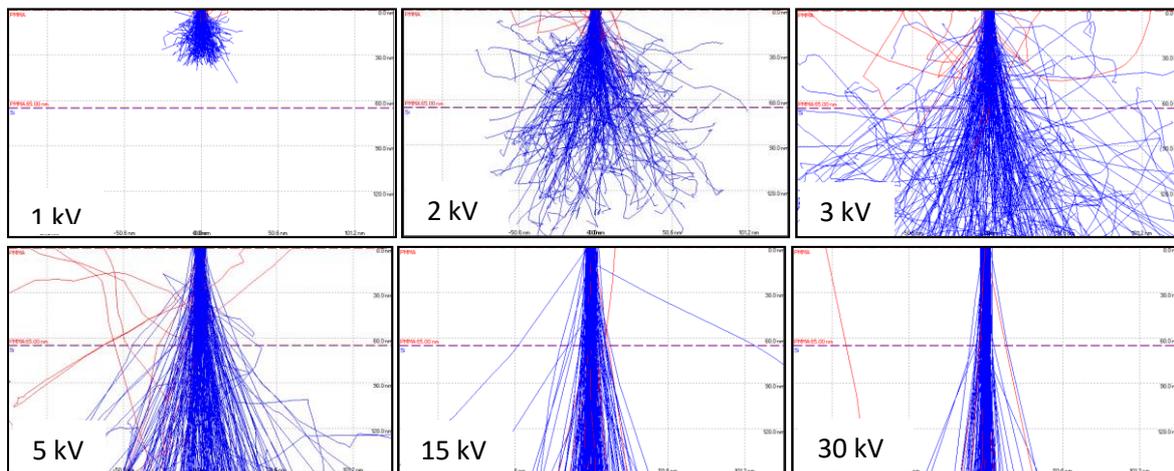


Figura 1: Simulação da interação e espalhamento do feixe de elétrons com PMMA 65 nm de espessura sobre Si, para diferentes energias do feixe incidente

Em regime de baixas energias, com voltagem de aceleração de até 2 kV, a maior parte da energia é depositada no resiste, e uma mínima parcela da energia interage com o substrato. Nesse caso, a estrutura final (após revelação) adquire um perfil tridimensional no formato de gota, devido à dissolução do resiste que ocorre em função da quebra das cadeias moleculares no interior do volume de interação. Em voltagens de 15 kV a 30 kV, ocorre menor alargamento do feixe incidente e maior interação dos elétrons retroespalhados a distâncias

radiais do local de exposição (efeito de proximidade). Por essa razão, a fim de produzir estruturas com alta resolução, deve-se encontrar o valor ótimo para a dose (corrente/área) do feixe incidente em função da espessura do resiste e dimensões do padrão, entre outras variáveis.

Esse trabalho envolveu também a geração de layout no DrawBeam, um software do sistema SEM-FEG MIRA3 do CTI dedicado a processos de litografia. A Figura 2(a) apresenta um layout para teste de dose de linhas *single pixel lines* (SPL), e a Figura 2(b) é uma imagem de microscopia obtida após processamento das estruturas. O layout é composto por uma matriz de 16 campos de escrita de 50 um cada, e cada campo compõe uma camada (*layer*) com linhas SPL na horizontal e na vertical e dose definida. Acima das linhas em cada campo está a legenda com o valor da dose aplicada. As legendas receberam a mesma dose aplicada às linhas em cada campo de escrita e, pelo fato de ter recebido alta dose sobre área (nas letras e números), essa região foi sobre-exposta, provocando efeitos de proximidade e de imagem reversa. As cruzes nas extremidades do layout receberam dose de área de  $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $1000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $1500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  e  $2000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , respectivamente.

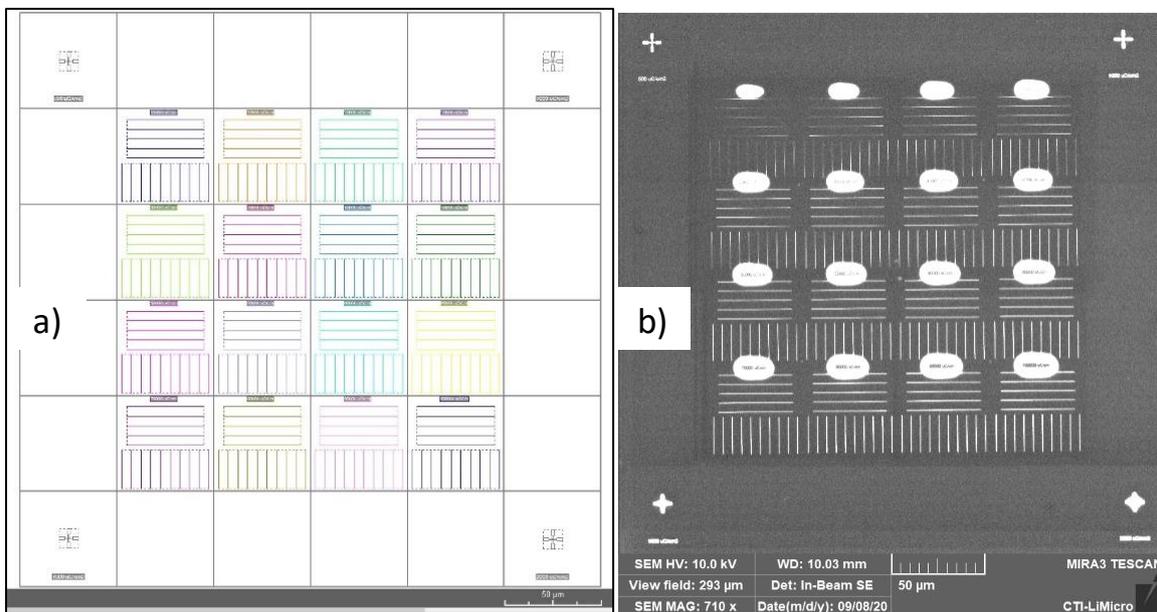


Figura 2 – (a) Layout projetado em DrawBeam para teste de dose de linhas, (b) Imagem MEV após litografia com energia do feixe de 30 kV e corrente de 47 pA

Durante as medidas de AFM, a sobre-exposição nas legendas permitiu encontrar as estruturas e distinguir entre os campos de escrita. Elas puderam ser identificadas pelo tamanho, e facilmente associadas à área em que se desejava fazer a medida. A Figura 3 apresenta imagens AFM 3D, 2D e o perfil de linha para doses de (a)  $30.000 \mu\text{C}/\text{cm}$ , (b)  $70.000 \mu\text{C}/\text{cm}$  e (c)  $100.000 \mu\text{C}/\text{cm}$ . A dose de  $30.000 \mu\text{C}/\text{cm}$  é a dose mínima suficiente para produzir uma linha com profundidade da espessura do resiste (65 nm) e largura de 20 nm. A partir de  $65.000 \mu\text{C}/\text{cm}$ , a largura de linha atinge um valor máximo de aproximadamente 300 nm e, a partir deste valor, o aumento da dose provoca alargamento no perfil do degrau, como pode ser observado ao comparar os perfis de linha das Figuras 3(b) e 3(c). Nessa análise, não foi considerada a deconvolução da forma da ponta de AFM. O gráfico na Figura 4 apresenta a taxa de aumento da largura das linhas em função da dose aplicada.

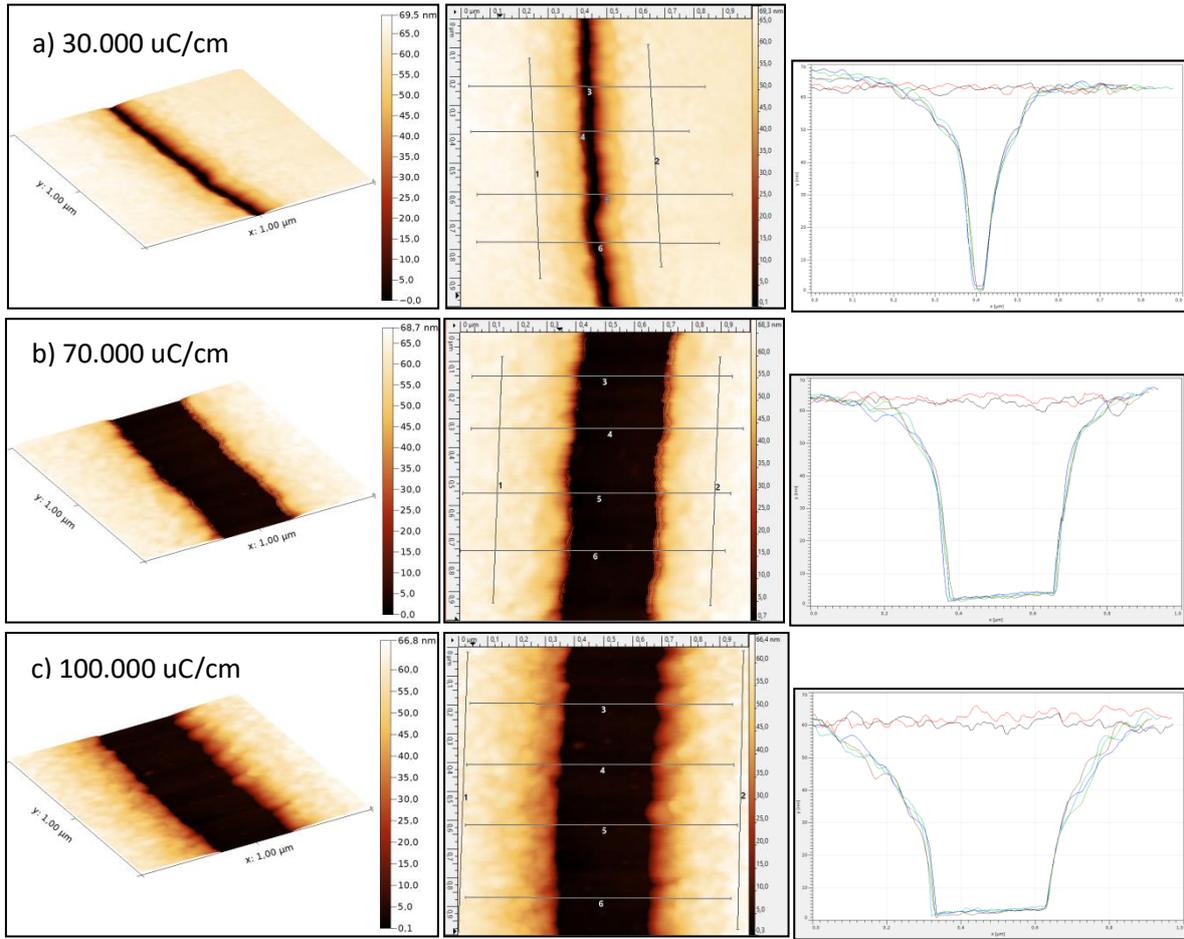


Figura 3 - Linha single pixel produzidas com doses de (a) 30.000 uC/cm (b) 70.000 uC/cm e (c) 100.000 uC/cm, apresentadas em imagem AFM 3D, imagem AFM 2D e perfil da linha

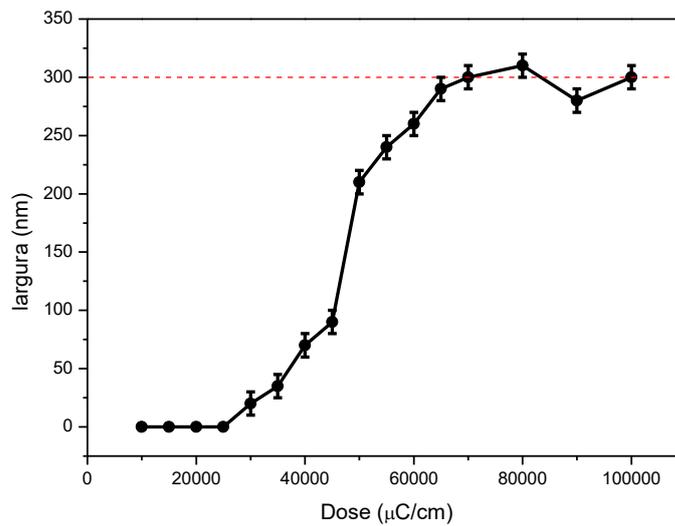


Figura 4 - Gráfico da largura de linha em função da dose aplicada para linhas *single pixel* produzidas com energia de 30 kV e corrente de 45 pA no SEM-FEG MIRA 3 do CTI

#### 4. Conclusões

Este artigo apresenta uma análise a partir de simulações e desenvolvimento experimental em processos de fabricação de nanoestruturas através de escrita direta por feixe de elétrons com energias de 5 kV a 30 kV para produzir estruturas de mais alta resolução. Como resultado, linhas de único pixel (*single pixel lines*) foram produzidas com 20 nm de largura e dose de 30.000  $\mu\text{C}/\text{cm}$ , ou seja, com largura do diâmetro do feixe e sem acumulação de varredura. As linhas foram produzidas com voltagem de 30 kV e corrente de 47 pA. A geração dos layouts e padrões geométricos foi projetada em DrawBeam, um software dedicado do sistema SEM-FEG MIRA3 do CTI.

A curva de largura de linha em função da dose aplicada permite associar a resolução das nanoestruturas produzidas às propriedades do feixe e parâmetros do processo. Como consequência desse estudo, podemos explorar novas metodologias e definir estratégias mais refinadas em litografia com feixe de elétrons com alta resolução. Os resultados obtidos a partir deste trabalho fornecem orientação no desenvolvimento de processos para aplicações mais específicas, como por exemplo, em sensores fotônicos, optoeletrônicos, plasmônica, entre outros. Portanto, este trabalho contribui para as atividades de pesquisa aplicada em microeletrônica do CTI Renato Archer através do desenvolvimento de processos e protótipos, proporcionando a integração das competências institucionais e contribuindo para o avanço da área de sensores e atuadores no CTI.

#### Referências

**CASINO v2.42** - *A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users*. Versão 2.42. Disponível em: <https://www.gel.usherbrooke.ca/casino/index.html>.

**CUI, Z.** *Nanofabrication by Electron Beam*. Ch3. Nanofabrication. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

**GOLDSTEIN, J., NEWBURY D., JOY D., ECHLIN, P., LYMAN C.E., LIFSHIN, E., SAWYER L. & MICHAEL, J.R.** *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. 3ª Ed. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2003.

**MOHAMMAD, A., MUHAMMAD, M., DEW, S. & STEPANOVA, M.** *Fundamentals of Electron Beam Exposure and Development*. Ch 2, Nanofabrication. Wien: Springer-Verlag, 2012.

**SEMICONDUCTOR TODAY.** *Silicon photonics market to grow at 23.4% CAGR from \$1bn to \$3bn in 2025*. Disponível em: [www.semiconductor-today.com/news\\_items/2020/jun/silicon-photonics\\_220620.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/jun/silicon-photonics_220620.shtml). Acessado em: 18 out 2020.