

FABRICAÇÃO DE CRISTAIS FOTÔNICOS 2D UTILIZANDO LITOGRAFIA HOLOGRÁFICA E PLASMA RIE

J.W. Menezes^{1*}; F.A. Quiñónez¹; A.M. Nunes², R.D. Mansano³, E.S. Braga⁴; L. Cescato¹

¹Instituto de Física "Gleb Wataghin", DFMC, UNICAMP, C.P. 6165, 13083-970, Campinas, SP

²Centro de Componentes Semicondutores, CCS, UNICAMP, 13083-970, Campinas, SP

³Escola Politécnica, LSI, USP, 05508-900, São Paulo, SP

⁴Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, C.P. 6101, 13081-970, Campinas, SP

Recebido: 22 de julho, 2006; Revisado: 14 de março, 2007

Palavras-chave: cristal fotônico, litografia holográfica, litografia RIE.

RESUMO

Neste trabalho, foi utilizada a técnica de litografia holográfica aliada à litografia por íon reativo (RIE) para fabricação de cristais fotônicos bidimensionais em dois tipos diferentes de materiais: Si cristalino(100) e filmes de carbono amorfo hidrogenado(a-C:H).

ABSTRACT

Holographic lithography allied with Reactive Ion etching (RIE) was used to record 2D photonic crystals in two different materials: crystalline Si wafers (100) and films of hydrogenated amorphous carbon (a-C:H).

1. INTRODUÇÃO

Cristais fotônicos são estruturas constituídas por uma forte modulação periódica do índice de refração, com período da ordem do comprimento de onda que podem, em determinadas condições, gerar bandas proibidas para propagação da luz [1-2]. Inúmeras aplicações têm sido propostas envolvendo camadas de cristais fotônicos 2D tais como: guias de onda com baixíssima perda, cavidades ressonantes extremamente pequenas e outros dispositivos funcionais [2]. Para exibir um gap fotônico na região desejada do espectro eletromagnético, a geometria da estrutura 2D deve ser apropriadamente definida. Materiais que possuem índice de refração em torno de dois apresentam gaps fotônicos somente para simetria hexagonal enquanto que materiais semicondutores com índice de refração em torno de $n=3,5$ apresentam gaps fotônicos para ambas as simetrias (quadrada ou hexagonal) [1][3]. Por outro lado, camadas dielétricas com furos de ar, ao invés de colunas dielétricas imersas em ar, são mais convenientes para fabricação de guias de cristais fotônicos porque apresentam maior índice de refração efetivo da camada fotônica, facilitando o guiamento de luz[3].

Camadas fotônicas 2D podem ser fabricadas utilizando litografia por feixe de elétrons [4] ou litografia por feixe de íons (FIB) [5]. Estas técnicas aliam alta resolução e flexibilidade uma vez que padrões arbitrários podem ser gravados.

Entretanto, estas técnicas exigem o uso de equipamentos sofisticados e elevado tempo de escrita uma vez que as estruturas são gravadas uma a uma. Como os cristais fotônicos são estruturas periódicas, o uso da técnica de litografia holográfica aparece como uma alternativa interessante, pois é possível gravar estruturas com alta resolução em áreas grandes a custo muito baixo.

Neste trabalho, descrevemos o uso desta técnica para gravar camadas fotônicas 2D utilizando corrosão por plasma de íon reativo (RIE). Foram gravadas estruturas de simetria quadrada em substratos de silício e de simetria hexagonal em filmes de carbono amorfo.

2. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A gravação holográfica consiste na exposição de um filme de fotorresina a um padrão de luz obtido pela interferência de dois feixes de luz coerentes. A maneira mais simples para obter estruturas 2D utilizando litografia holográfica é uma dupla exposição do padrão de interferência de dois feixes, com uma apropriada rotação da amostra entre as duas exposições. A figura 1 mostra a simulação da intensidade de luz resultante da superposição de dois padrões de franjas senoidais rodados entre eles 90° e 60° , respectivamente. Como pode ser visto, a rotação de 90° gera uma rede de simetria quadrada enquanto uma rotação de 60° gera estruturas com simetria hexagonal.

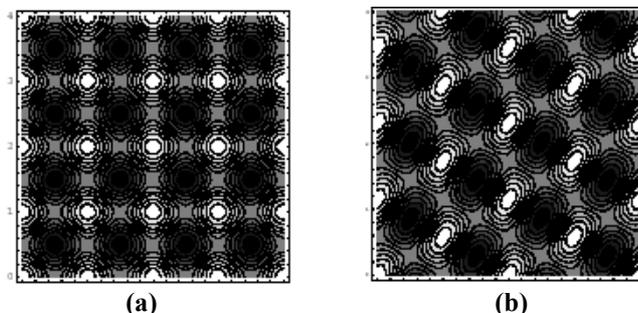


Figura 1 - Padrão de iso-intensidade de luz, resultante da superposição de dois padrões de interferência rodados de: (a) 90° e (b) 60° .

* jacsonwm@ifp.unicamp.br

A figura 2 mostra um esquema geral do processo de fabricação. O processo inicia com a limpeza do substrato a ser utilizado, que pode ser uma lâmina de silício ou uma lâmina de vidro com uma camada de carbono amorfo hidrogenado a-C:H previamente depositada. Estes dois materiais foram escolhidos para gravação dos cristais fotônicos devido ao seu alto índice de refração ($n=3,4$ para o Silício e $n\sim 2$ para o carbono).

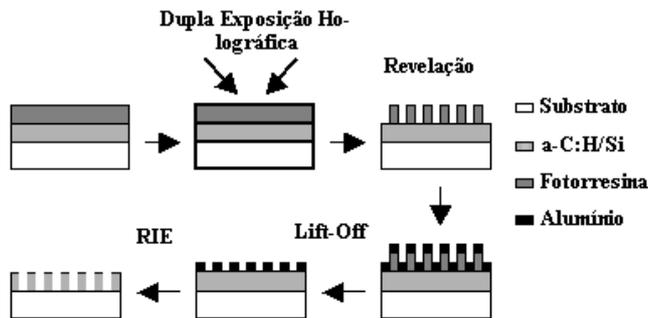


Figura 2 - Esquema do processo de fabricação.

A deposição dos filmes de carbono amorfo hidrogenado foi realizada por "sputtering", usando as seguintes condições: pressão de 5mTorr, potência de 150 W e fluxo de massa de CH₄ de 40 sccm e 10 % de Ar. Nestas condições foram obtidos filmes de a-C:H com índice de refração de aproximadamente 2 e taxa de deposição de 1 μ m/hora.

Os substratos de Si utilizados foram do tipo p, com orientação (100). A litografia holográfica em substratos refletor, como o silício, é complicada por causa da presença de ondas estacionárias de alto contraste devido à coerência do laser [6]. Para resolver este problema é possível utilizar camadas anti-refletoras (BARC e ARCS) depositadas em baixo do filme fotorresina [7]. O uso de BARCS e ARCS, entretanto requer a introdução de um ou mais etapas no processo litográfico. Em um recente trabalho [8], foi demonstrado que utilizando uma camada de SiO₂ sobre o substrato de Si, com espessura igual a um período completo da onda estacionária, este efeito da onda estacionária pode ser reduzido, melhorando a litografia. Além disto; a própria camada de dióxido de silício pode ser utilizada como máscara muito eficiente para a corrosão do substrato de Si. Assim, para gravação das estruturas em substratos de silício, foi utilizada uma camada intermediária de SiO₂ previamente crescida termicamente sobre o substrato de silício com a espessura apropriada.

Para gravação holográfica, foi utilizada a fotorresina positiva SC 1827 (Rohm and Haas) depositada por spinner sobre os substratos, formando uma camada de espessura em torno de 0,4 μ m. A fotorresina é então exposta duas vezes ao padrão de interferência, gerado em um setup holográfico [9], usando a linha $\lambda=458$ nm de um laser de argônio. Para geração de uma rede quadrada a amostra é rodada 90° entre as exposições, enquanto que para geração de uma rede hexagonal a amostra é rodada 60°. Após as exposições, a fotorresina (SC 1827) é revelada (revelador AZ 351-1:4), convertendo o padrão de luz em um padrão em relevo.

As figuras 3(a) e 3(b) mostram as estruturas resultantes gravadas sobre filmes de carbono amorfo hidrogenado e silício, respectivamente. Nos filmes de carbono amorfo hidrogenado foram gravadas estruturas de simetria hexagonal enquanto estruturas de simetria quadrada foram gravadas em substratos de silício. Note, neste último, a presença das ondas estacionárias nas estruturas de fotorresina, devido ao substrato ser altamente refletor neste comprimento de onda. O período das franjas foi de 0,5 μ m. A energia de cada exposição foi 355mJ e o tempo de revelação foi 1min.

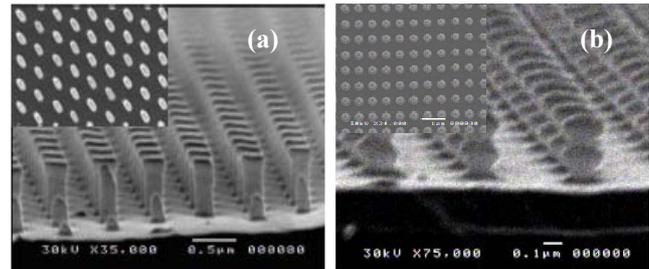


Figura 3 - Gravação holográfica utilizando dupla exposição rotacionando a amostra entre elas de (a) 60° e (b) 90°

As colunas de fotorresina são então usadas como máscara num processo de "lift-off" usando deposição por evaporação térmica de um filme de alumínio com cerca de 80nm como máscara intermediária. A figura 4 mostra resultados após corrosão por RIE da camada de a-C:H. As condições do processo foram: pressão de 100mTorr, potência de 100W, 50sccm de fluxo de O₂ resultando em uma taxa de corrosão de 0,125 μ m/min. Usando estas condições e tempo de corrosão de 12 minutos, estruturas com 1,5 μ m de profundidade foram obtidas, com pequena variação na secção transversal dos furos.

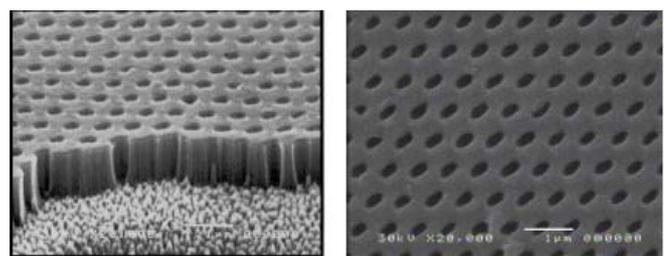


Figura 4 - Litografia RIE feita na camada de a-C:H. O tamanho da barra da escala é 1 μ m.

Como pode ser visto, a razão r/a (razão entre o raio do furo e o período das estruturas) permanece praticamente a mesma das estruturas gravadas em fotorresina, indicando que a corrosão ocorreu de forma anisotrópica. Para maiores tempos de corrosão por RIE, observou-se forte variação na geometria ao longo do filme, assim como uma redução na razão entre os raios da elipse.

A transferência do padrão gravado em alumínio após *Lift-off* para o substrato de silício foi feita em duas etapas. Primei-

ramente foi transferido o padrão para a camada intermediária de SiO₂ e posteriormente transferido para o substrato de silício utilizando RIE. A figura 5 mostra resultados da transferência do padrão gravado em fotorresina para a camada intermediária de SiO₂. Para isso, a amostra foi submetida a uma corrosão por íon reativo usando CF₄. As condições utilizadas para corrosão do SiO₂ foram: 50W de potência de R.F., 100 sscm de vazão de CF₄ e 30 minutos de duração. Para corrosão do Si, as amostras foram submetidas à corrosão por RIE, utilizando a camada de SiO₂ como máscara. Os resultados estão mostrados na figura 6, e foram obtidos com as seguintes condições de processo: 50W de potência, pressão de 50mTorr, fluxo de massa de SF₆ /CHF₃ /CF₄ (3/10/12) e tempo de 4min. Como pode ser visto, existe um aumento no diâmetro do furo obtido na corrosão de Si devido à isotropia da corrosão. Embora tenha havido este alargamento do diâmetro do furo, é visto que quanto maior for o diâmetro do buraco, maior é a faixa de frequências no gap fotônico [1]. Este aumento da banda proibida de frequências indica que o aparecimento do gap não é tão crítico com as variações na geometria da estrutura, facilitando a fabricação da camada fotônica. Simulações teóricas destas estruturas mostram que as estruturas fabricadas, tanto em carbono amorfo hidrogenado como em substratos de silício apresentam parâmetros necessários para se ter um gap fotônico em torno de $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ [3][10].

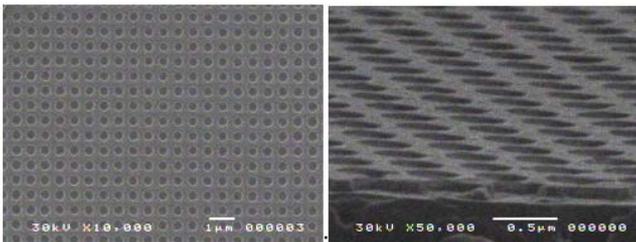


Figura 5 - Transferência do padrão em alumínio para a camada de SiO₂.

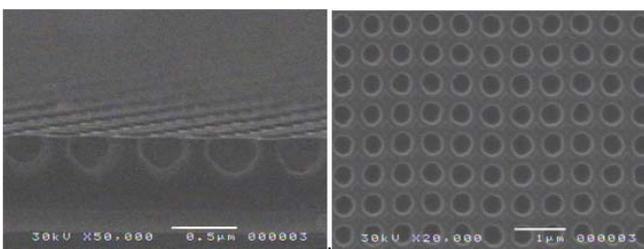


Figura 6 – Padrão gravado nos substratos de Si cristalino utilizando a camada de SiO₂ como máscara.

3. CONCLUSÕES

Cristais fotônicos bidimensionais foram fabricados levando-se em conta as geometrias factíveis pelo processo de litografia holográfica. Foram utilizados filmes de carbono amorfo hidrogenado para fabricação de cristais fotônicos de simetria hexagonal e substratos de silício para fabricação de cristais fotônicos de simetria quadrada. Estes materiais são promissores para fabricação de dispositivos fotônicos devido a seu alto índice de refração. A transferência do padrão gravado na fotorresina para o filme de carbono amorfo hidrogenado, utilizando RIE, foi anisotrópica, mantendo o mesmo diâmetro da estrutura gravada na fotorresina enquanto que a transferência do padrão para o substrato de silício foi isotrópica, alargando o diâmetro dos furos.

AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos, pelo suporte financeiro, à Fundação de Ampara a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

1. JOANNOPOULOS, J.D.; MEADE, R.D.; WINN, J.N., *Photonic Crystal*, Princeton University Press, USA, 1995.
2. NOTOMI, M.; SHINYA, A.; KURAMOCHI, E., *NTT Technical Review* 2 (2004) 36-47.
3. QUIÑÓNEZ, F.; MENEZES, J.W.; CESCATO, L.; RODRIGUEZ-ESQUERRE, V.F.; HERNANDEZ-FIGUEROA, H.E.; MANSANO, R.D., *Optics Express* 14 (2006) 4873-4879.
4. CHENG, C.C.; SHERER, A., *J. Vac. Sci. Technol. B* 13 (1995) 2696-2700.
5. BALASUBRAMANIAN, K.; HEARD, P.J.; CRYAN, M.J., *J. Vac. Sci. Technol. B* 24 (2006) 2533-2537.
6. LEVINSON, H. J., *Principles of Lithography*, SPIE Press, USA, 2005.
7. Shippley: <http://www.chestech.co.uk/>
8. CARVALHO, E.J.; ALVES, M.A.R.; BRAGA, E.S., CESCATO, L., *Microelectron. Journal* 37 (2006) 1265-1270.
9. FREJLICH, J.; CESCATO, L.; MENDES, G.F., *Appl. Opt.* 27 (1988) 1967-1976.
10. MENEZES, J.W., Projeto de Camadas Fotônica Bidimensionais e Fabricação Utilizando Múltiplas Exposições Holográficas. Dissertação de Mestrado (2006). Universidade estadual de Campinas, Campinas (SP).