

P&D e Aplicação de Circuitos Integrados Ópticos/Fotônicos e Sensoreamento em Rede Óptica

Wilson de Carvalho Júnior (CTI), wcarvalho@cti.gov.br

Resumo

Este trabalho apresenta uma melhoria no conjunto de processos aplicados na fabricação de guias de onda polimérico sobre substrato de Si/SiO₂. O processo proposto reduziu as perdas ópticas observadas nos guias, reduzindo também o espalhamento das perdas no chip de 20dB para 4,4dB. A fonte dos altos valores de perda óptica foi identificada como sendo proveniente do processo de serra dos chips.

Palavras-chave: Fotônica em Si; Polímeros; Processos de Microeletrônica

1. Introdução

O uso de materiais poliméricos em conjunto com técnicas de fotônica integrada em silício permite a fabricação de novos dispositivos fotônicos de baixo custo como biosensores (ESINENCO, 2005), óptica integrada (Muller, 2010), como ressonadores, moduladores e filtros, micro atuadores, etc. O polímero comercial SU-8 é um dos materiais mais utilizados para este tipo de aplicação, permitindo a criação de estruturas com alta razão de aspecto (Del Campo, 2007).

Processos anteriormente apresentados (Ramirez, 2017) resultaram em dispositivos cujas características ópticas apresentavam grandes variações nos valores das perdas ópticas. Variações nos valores acima de 20dB, bem como valores nominais de perdas óticas superiores a 45dB eram frequentemente observadas nas medidas ópticas. Estes resultados indicavam que havia grande perda do sinal óptico na estrutura.

Este trabalho foi dirigido para identificar e sanar as causas da alta perda apresentada pelos componentes. Será apresentado o desenvolvimento e a melhoria dos processos para fabricação de guias de ondas poliméricos de SU-8 assentados sobre óxido de silício.

2. Desenvolvimento de processos para fabricação de guias de ondas usando SU-8

Os componentes testados foram fabricados dentro de um acordo de cooperação firmado entre o CEITEC e o CTI e consistiam de vários guias de onda sobre um substrato de silício com uma camada de óxido de silício (SiO₂). O processo de formação do óxido e corrosão para formação dos canais foi feito no CEITEC. Os *wafers* foram, então, enviados para o CTI que efetuou a deposição do filme de SU-8 e a caracterização óptica. O esquema com as dimensões nominais dos guias de onda está mostrado na Figura 1. Os guias de onda consistem de um rebaixo formado na camada de SiO₂ que será preenchido posteriormente com o polímero SU-8. A largura do rebaixo no óxido tem 0,6µm de profundidade e 2,2µm de largura, com comprimento total de 21mm.

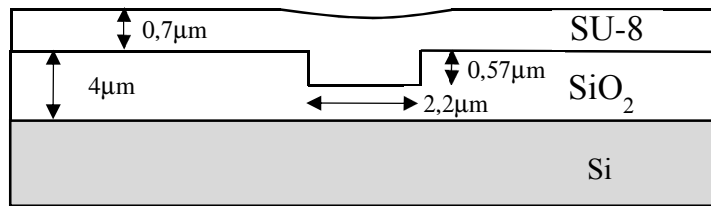


Figura 1 - Esquema de um guia de onda formado em SiO₂ e polímero SU-8

Cada *wafer* de 6 polegadas contém 25 chips idênticos, com diferentes tipos de guias de onda em cada chip, conforme indicado na Figura 2. Estes guias formam blocos funcionais como guia passante (*through*), guia anel ressonante (*ring*) e guia divisor de sinal (*split*). Neste trabalho iremos utilizar apenas os guias passantes como referência de comparação entre os processos adotados.

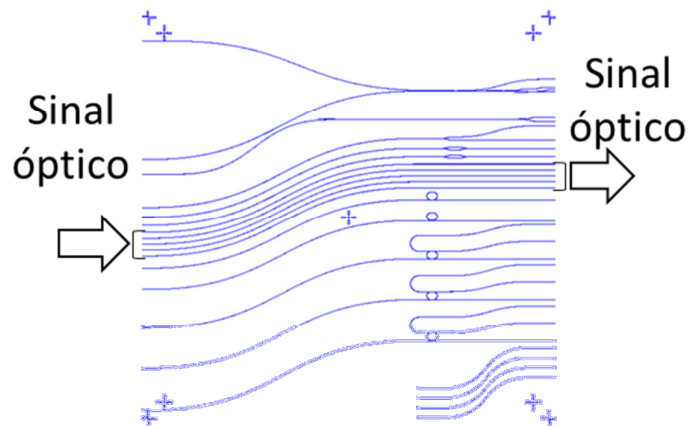


Figura 2 - Esquema de um chip óptico. Cada *wafer* de Si de 6 polegadas contém 25 chips com 21mm de comprimento. Os guias utilizados para os testes estão indicados.

Solução SU-8

O polímero SU-8 pode ser adquirido comercialmente da empresa MicroChem em várias concentrações dissolvidas em ciclopentanona, conforme indicado na Tabela 1, permitindo a deposição de filmes com uma vasta variação de espessura entre 0,5 a 260µm.

Tabela 1 - Soluções de SU-8 disponíveis no mercado

Solução	Concentração (% volume)	Faixa de Espessura (µm)
2000.5	14,30	0,5 ~ 0,9
2002	29,00	2,0 ~ 2,9
2005	45,00	4,0 ~ 7,0
2007	52,50	7 ~ 13
2010	58,00	20 ~ 21
2015	63,45	13 ~ 37
2015	76,75	180 ~ 650
2100	75,00	100 ~ 260
Fonte: MicroChem, www.microchem.com		

Inicialmente produziu-se a solução de SU-8 seguindo o procedimento descrito em (Ramirez, 2017). A solução de SU-8 foi preparada usando 9,33ml de SU-8 2100, diluído em 40,67ml de ciclopentanona, resultando em uma solução com 14% de concentração volumétrica de SU-8. A solução foi mantida em geladeira e retirada 3 horas antes da deposição.

O processo de deposição do polímero SU-8 utiliza espalhamento por rotação (*spinner*), resultando em um filme polimérico com espessura entre 0,5 e 1,0 μ m, dependendo da velocidade de rotação e da concentração da solução de SU-8. Esta etapa é decisiva no processo para obtenção de guias ópticos de baixa perda e boa uniformidade.

Utilizando a solução preparada com concentração de 14%, notou-se que a espessura do filme depositado apresentava grandes variações entre as deposições, com valores entre 0,8 e 1,6 μ m. Este efeito poderia ser explicado por variação da temperatura da solução, variação da concentração ou na velocidade do *spinner*. Analisando o problema concluiu-se que a solução apresentava variação de concentração do SU-8 ao longo do frasco. Dependendo da altura que o líquido era aspirado com a seringa, a concentração era maior ou menor, resultando, como consequência, em filmes com variação de espessuras. Para resolver este problema adotou-se a prática de manter um agitador magnético (peça metálica coberta de teflon) dentro do frasco e agitar a solução durante o período de retirada da geladeira até o momento da deposição no *spinner*. Desta forma conseguiram-se filmes de SU-8 com espessuras de 0,8 μ m com controle e reprodutibilidade.

Também se utilizou uma solução comercial de SU-8, designada como 2000.5 (ver Tabela 1) com concentração nominal de 14,3%. A comparação de desempenho, características ópticas e morfológicas entre as duas soluções ainda está sendo objeto de estudo.

Bolhas no filme SU-8

Após a deposição do SU-8 era necessário um tratamento térmico (*bake*) para remover o solvente e promover a solidificação do filme de SU-8. Após o processo de tratamento térmico em placa quente, observou-se que a camada de polímero apresentava alta densidade de bolhas, com a total degradação do filme de SU-8, conforme mostrado na Figura 3.

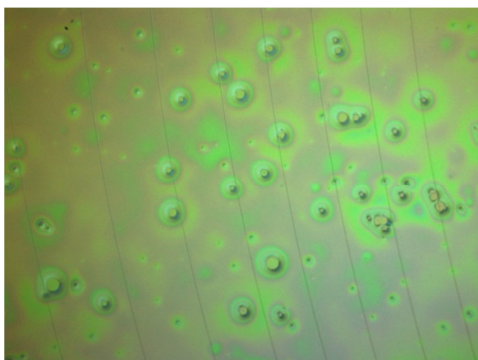


Figura 3 - Morfologia do filme de SU-8 após o tratamento térmico com alta densidade bolhas. As linhas são os guias de onda gravados no substrato

A provável causa para formação das bolhas era a rápida evaporação do solvente do filme de SU-8 com a conseqüente formação das bolhas. Uma forma de reduzir a formação das bolhas foi manter o filme de SU-8 por longo tempo (mais de 12 horas) no ambiente do laboratório e executar o *bake* após este período de descanso. Este processo removeu completamente as bolhas nos filmes.

Partículas no filme SU-8

Outro aspecto importante da deposição dos filmes de SU-8 foi o aparecimento de que partículas sólidas incorporadas no filme, provocando muitos defeitos e morfologia ruim. Estas partículas não eram visíveis a olho nu no líquido, mas eram observadas, depois do tratamento térmico, como pontos escuros no meio de círculos concêntricos nos filmes. A utilização de um filtro de partícula de $0,22\mu\text{m}$ na seringa com a solução de SU-8 diminuiu consideravelmente o número de partículas observadas nos filmes. Contudo, observou-se que a solução de SU-8 reagia com o material do invólucro do filtro, dissolvendo o plástico do invólucro. Cada filtro deve ser utilizado apenas uma única vez, para evitar que pedaços de plástico sejam carregados para o filme. Caso isso aconteça, perde-se todo o cristal, pois durante a rotação, aquele pedaço se espalha por toda superfície do cristal, resultando em morfologia enrugada, não uniforme e repleta de defeitos conforme mostrado na Figura 4.

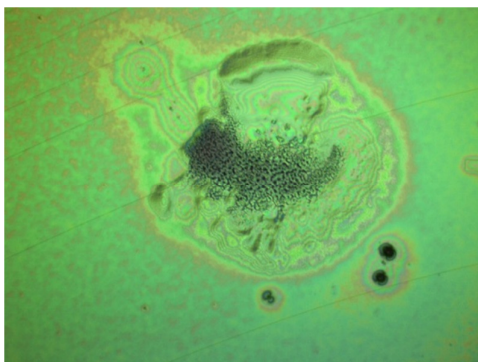


Figura 4 - Grande defeito na camada de SU-8 devido à presença de partículas sólidas devido à reação da solução com o material do filtro. As linhas finas são os guias de onda.

Separação dos chips

Após o processo de tratamento térmico dos filmes de SU-8, os chips foram cortados individualmente e testados. O processo de corte utiliza uma serra circular de diamante, refrigerada com água, e específica para o corte de silício.

Analisando as faces cortadas observou-se grande degradação da superfície devido ao processo de serragem dos chips, levantando a suspeita de que o espalhamento nos resultados estava relacionado com a qualidade das bordas. Na Figura 5 está mostrada a borda de um chip após o processo de serra. Nota-se que a passagem da lâmina da serra danifica fortemente a superfície, gerando muitos riscos e arranhões.

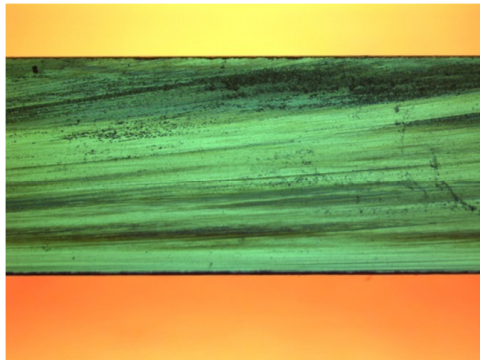


Figura 5 – Danos provocados na face do chip após o corte com serra de diamante

Analisando a borda da superfície dos chips ficou evidente que grande parte da borda estava destruída ou seriamente danificada, conforme mostrado na Figura 6. A entrada do guia de onda está apenas $0,6\mu\text{m}$ da superfície, tendo, portanto, alta probabilidade de ser danificada no processo de corte. Tais avarias na borda dos chips provocavam forte espalhamento da luz, e, conseqüentemente, reduzindo ou mesmo impedindo o acoplamento óptico com o guia de onda.

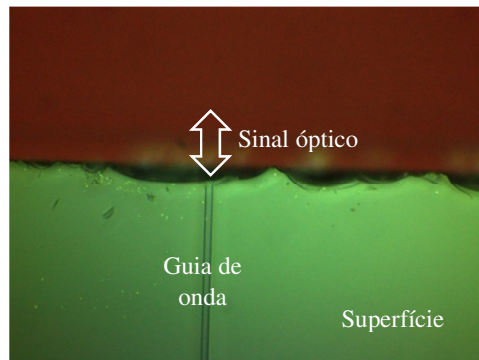


Figura 6 - Aspecto da superfície na borda do chip, mostrando irregularidades e danos causados pela serra. A seta indica a entrada/saída do sinal óptico

Polimento dos chips

Uma forma de redução nos danos foi efetuar um polimento mecânico da superfície serrada, removendo os defeitos, trincas e riscos, com a conseqüente melhora no acoplamento do sinal óptico.

O processo de polimento foi feito em três etapas consecutivas: a) deposição de camada de fotoresist AZ1518 para proteção da superfície com a estrutura dos guias, evitando o acumulo de resíduos do polimento nos canais que formarão os guias de onda, b) desbaste mecânico usando politriz com lixa 2400 em água e c) polimento com pano de polimento e alumina em pó com granulação de $0,05\mu\text{m}$ e água. Este processo foi bem-sucedido e resultou em superfícies polidas e livres de danos provocados pela serra. O processo feito em ambiente com água também facilita a posterior limpeza e remoção do filme de fotoresist.

Os chips foram, então, limpos usando uma solução de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3$, 19:1, $T = 80^\circ\text{C}$, por 5 minutos. Este ataque químico preserva toda a estrutura dos guias existente no dióxido de silício, remove partículas, resíduos sólidos e orgânicos, resultando em uma superfície adequada para a

deposição do filme de SU-8 com boa uniformidade e aderência. Após a limpeza, os cristais eram mantidos por, no mínimo, 3 horas em estufa a 90°C até o momento de deposição do polímero.

O processo de deposição do filme de SU-8 foi feito em duas etapas de *spinner*:

- Espalhamento inicial com 500rpm, aceleração de 100rpm/s por 10 segundos
- Deposição do filme a 5000rpm, aceleração de 500rpm/s por 40 segundos

Após descanso por 12 horas em ambiente aberto (laboratório), efetuou-se o tratamento térmico do filme:

- Ciclo de temperatura de 45°C até 95°C, mantido a 95°C por 1 minuto
- Ciclo de temperatura de 95°C até 150°C, mantido a 150°C por 2 minutos

Caracterização óptica

Os chips foram testados utilizando o sistema Agilent 8163, composto por um laser sintonizável e um medidor de potência óptica. O sinal do laser passava por um sistema de controle de polarização (orelha *mickey*) e era inserido no guia de onda do chip usando uma fibra óptica com lente. Na saída, usando também fibra com lente, o sinal era coletado e enviado ao medidor de potência. A potência do laser foi de +6dBm e sua varredura em comprimento de onda cobriu a faixa de 1500 a 1570nm.

Na Figura 7 estão mostradas as curvas espectrais típicas de cinco guias diretos de um chip processado antes das modificações mencionadas neste trabalho. Testes realizados em diversos chips mostravam perdas ópticas tipicamente entre 24dB e 50dB em 1550nm.

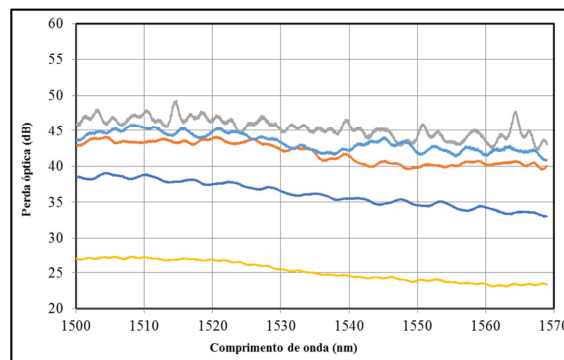


Figura 7 – Características ópticas dos cinco guias diretos de um chip.

Na Figura 8 estão mostrados medidas ópticas em dois conjuntos de 5 guias ópticos para dois chips diferentes. O impacto da mudança no processamento dos chips é evidente quando se comparam as Figuras 7 e 8. Considerando o comprimento de onda em 1550nm, o espalhamento nos valores das perdas ópticas foi reduzido de ~20dB para 4.4dB.

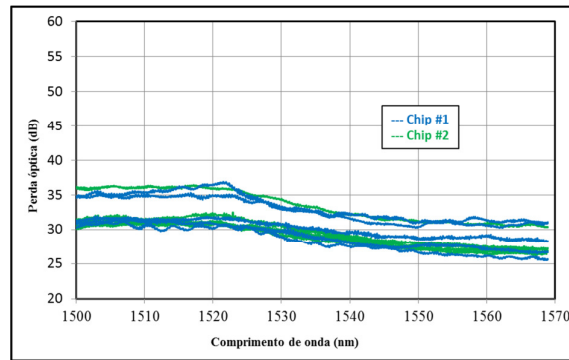


Figura 8 – Características ópticas de 5 guias diretos de dois chips com obtidas com o novo processo

3. Conclusão

Foram apresentadas melhorias no processo de fabricação de guias de onda de SU-8 sobre substrato de silício com óxido de silício. As alterações no processo resultaram em guias de onda de baixa perda óptica, com melhoria da uniformidade e reprodutibilidade na fabricação dos dispositivos.

O novo método para processamento dos chips foi efetivo na melhoria das qualidades ópticas dos guias de onda. O espalhamento de valores das perdas ópticas foi reduzido de ~20dB para 4.4dB, bem como houve uma redução nos valores nominais das perdas ópticas, com valores tipicamente menores que 30dB.

4. Referências

DEL CAMPO, A. & GREINER, C., *SU-8 a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicrom application*, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, p. R81, 2007

ESINENCO, D., PSOMA, S.D., KUSK, M., SCHNEIDER, A. & MULLER, R., *SU-8 Micro-biosensor Based on Mach-Zehnder Interferometer*, Ver. Adv. Mater. Sci. Vol. 10, p.295, 2005.

MÜLLER, R., CRISTEA, D., KUSKO, M., OBREJA, P., ESINENCO, D., DAMIAN, V. & LOGOFATU, P.C., *SU-8 polymer materials used in integrated optic microsystem*, Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communication, Vol.4, n.2, p.228, 2010

RAMIREZ, J. C., SCHIANTI J. N., ALMEIDA, M. G., PAVANI, A., PANEPUCCI, R. R., HERMANDEZ-FIGUEIROA, H. E & GABRILLI, L. H., *Low-loss modified SU-8 waveguides by direct laser writing at 405 nm*, Optical Material Express, Vol. 7, n.7, p.2651, 2017.