

ESTUDO DE MICROLENTE BASEADAS EM GRAFENO USANDO A TÉCNICA DE REFLOW

Palavras-Chave: MICROLENTE, REFLOW E GRAFENO.

Autores/as:

ISABELLA BISEWSKI SANTOS SILVA – FEEC, UNICAMP

JACILENE MARTINS MEDEIROS – FEEC, UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE DINIZ (orientador) – FEEC, UNICAMP

INTRODUÇÃO:

As lentes, enquanto dispositivos de refração, reconfiguram a distribuição de energia transmitida, reformulando a frente de onda incidida (Hecht, 2017). Sendo assim, suas propriedades de espalhamento, planificação e focalização dos raios de luz garantem aos equipamentos compostos por lentes (lanternas, microscópios, câmeras, sensores ópticos, etc.), excelentes resultados ópticos — com menor distorção, maior amplitude do campo de visão, maior resolução e outros.

Referente à fabricação das microlentes, os métodos atuais adotados são classificados em indiretos e diretos, conforme a necessidade, ou não, de fabricação de máscaras constituídas pela geometria final das lentes (Yuan et al., 2018). Diante disso, alguns desses processos são: *reflow* térmico, estampagem de microplásticos, impressão por jato de tinta, etc. No geral, os processos convencionais consistem na formação de estruturas cilíndricas por litografia e o emprego de altas temperaturas em suas estruturas para transformar as lentes em formato esférico (Figura 1). Além disso, podem envolver a aplicação de pressão em temperatura elevada entre um substrato polimérico e um molde de silício, e a deposição de gotículas de um líquido polimerizável em luz UV sobre um substrato (Yuan et al., 2018).

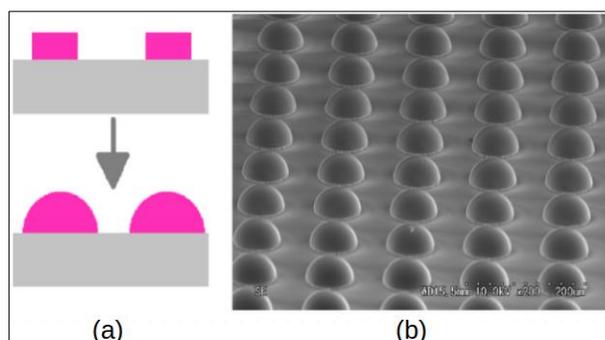


Figura 1: (a) ilustração esquemática das lentes antes (quadrada) e após (arco) a técnica reflow. (b) imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de lentes fabricadas com reflow. Adaptado por Samarco (2025).

Ademais, visto que lentes com alta rugosidade superficial apresentam dispersão de luz e redução da eficiência óptica (Yuan et al., 2018), e que o processo de *reflow* pode ter imperfeições na curvatura da lente (Kim & Chun, 2019), a integração destas lentes convencionais em circuitos ópticos de sensores e outros dispositivos podem afetar o desempenho destes sistemas.

Em vista disso, uma vez que o grafeno apresenta propriedades ópticas excepcionais como alta transparência (~98%), flexibilidade, resistência e mobilidade (Talebzadeh; Golmohammadi; Talebzadeh, 2024), a sua integração com um sistema de microlentes pode ser a solução para a melhoria do desempenho óptico deste conjunto. A sua integração pode aumentar a eficiência de dispositivos, gerando melhor difração e foco dos lasers, além de obter imagens de alta qualidade em sensores de imagens, etc.

Por sua vez, o propósito deste trabalho consiste em estudar a fabricação de microlentes a base de grafeno, como uma possível solução para o aumento da transmissão óptica de sensores. Deste modo, foram realizados processos de transferência de grafeno pelo método de pesca, litografia convencional empregada na fabricação de dispositivos MOS e a técnica de *reflow* para moldar o formato de arco na lente. Além do emprego das técnicas de caracterização: microscopia óptica, perfilometria mecânica e caracterização óptica.

METODOLOGIA:

A princípio, foi estudada a técnica de *reflow* para a fabricação de três amostras com microlentes convergentes plano-convexas: uma de referência (sem aquecimento) e outras duas submetidas a um tratamento térmico. A Figura 2 mostra o processo de fabricação das amostras: litografia usando um substrato de vidro, deposição de um agente de adesão (HMDS), centrifugação (*spinner*) a 5000 rpm durante 30 segundos, deposição do fotorresiste (AZ-5214) e centrifugação desta amostra, na mesma velocidade e tempo do processo anterior, a fim de garantir a uniformidade dos filmes (Figura 2(a)). Em sequência, a amostra foi alinhada com uma máscara de padrões circulares e exposta à radiação ultravioleta durante 40 segundos (Figura 2(b)). Após a exposição, utilizou-se o revelador (MIF-300) por 8 segundos, para revelar as estruturas das lentes sobre o substrato (Figura 2(c)) e, por fim, duas das três amostras produzidas foram submetidas ao processo de *reflow* (usando *hot-plate*) nas temperaturas de 135°C e 145°C por 5 minutos (Figuras 2(d)).

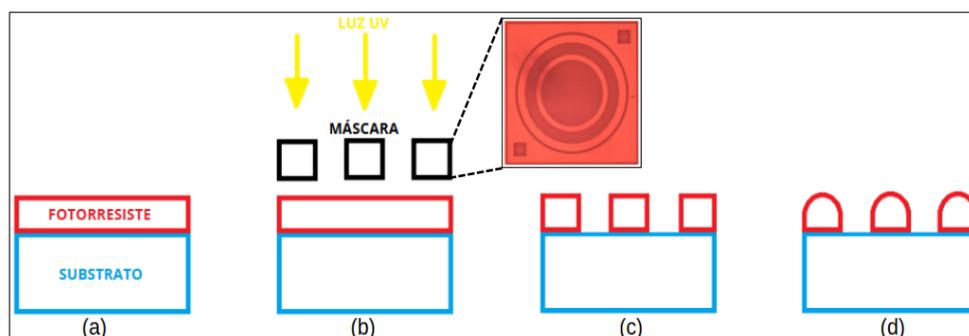


Figura 2: Ilustração das etapas de fabricação das lentes convergentes plano-convexas usando a técnica de *reflow* térmico. (a) mostra a camada de fotorresiste sobre o substrato, (b) amostra alinhada a uma máscara (lente Fresnel) e exposta a luz UV, (c) estruturas das lentes de fotorresiste e (d) estruturas das lentes de fotorresiste após o *reflow*.

Posteriormente, as três microlentes obtidas foram caracterizadas por microscopia óptica, em que as dimensões dos anéis externos das lentes foram obtidas. Além disso, o perfil de profundidade e o seu comportamento conforme o comprimento da lente foram estudados usando a técnica de perfilometria mecânica. Essa avaliação teve como finalidade a identificação da amostra com melhor desempenho dentre as três lentes analisadas.

Após a escolha do melhor processo, foram fabricadas microlentes baseadas em grafeno. Para isto foi feita a transferência de grafeno, um processo que envolveu, primeiramente, o corte de folhas de grafeno em cobre (crescido por CVD - Figura 3(a)) e a deposição de polímero (PMMA) com centrifugação (*spinner*) a 4000 rpm por 30 segundos, para a proteção do grafeno de alta qualidade (Figura 3(b)). Em seguida, as amostras foram tratadas (*hot-plate*) com temperatura de 170°C por 10 segundos, imersas em ácido nítrico (HNO₃) por 3 segundos para a corrosão de grafeno das costas, lavagem com H₂O-DI para limpeza do ácido e, finalmente, submersas numa solução de reagente Marble ($CuSO_4 = H_2O + HCL$) para corroer o cobre (Figuras 3(c) e 3(d)). Após, 24 horas de reação, uma lavagem do grafeno em H₂O-DI por 30 vezes, usando o processo de pesca, foi necessária para a limpeza da solução (Figura 3(e)). Ao fim deste processo, a amostra de grafeno com o PMMA foi transferida para o substrato de vidro (Figura 3(f)). Em sequência, após uma hora da transferência, a água foi evaporada e, posteriormente, a amostra foi aquecida a 180°C por 90 segundos (*hot-plate*). Por fim, a amostra foi submersa em acetona durante 24 horas, para a retirada do PMMA.

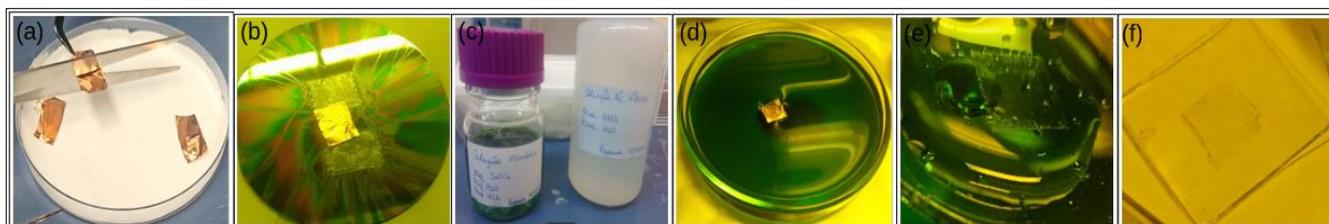


Figura 3: Imagens do processo de transferência de grafeno usando o método de pesca: (a) corte das folhas de grafeno em cobre fornecidas pelo MackGraph. (b) deposição do PMMA no spinner. (c) soluções que foram usadas no processo. (d) amostras imersas em solução Marble. (e) amostra com filme de grafeno e PMMA, durante o processo de pesca. (f) filme de grafeno transferido manualmente em vidro.

Após a transferência de grafeno, foi realizada a litografia óptica usando a mesma máscara e processos da litográfica de teste das lentes, porém somente com *reflow*. Ademais, para estudar o comportamento difrativo das lentes, foi feita a caracterização óptica das amostras de referência e com *reflow* de 135°C, sem e com o grafeno. A Figura 4 mostra os instrumentos usados nesta etapa.

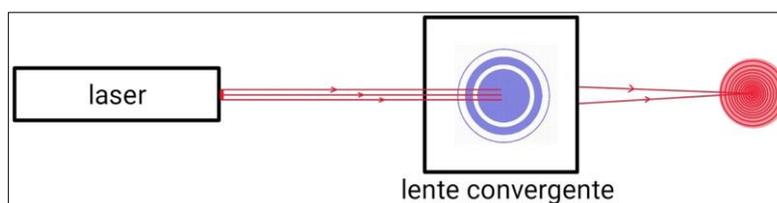


Figura 4: Esquemático, fora de escala, da caracterização óptica usando o laser de $\lambda = 633 \text{ nm}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para o processo de fabricação das lentes convergentes plano-convexas por *reflow*, foi usada a estrutura mostrada na Figura 2. A Tabela 1 demonstra as dimensões do anel externo das lentes, coletadas pelo microscópio óptico.

Deste modo, como pode ser observado na Tabela 1, as lentes com *reflow* sofreram um aumento no comprimento de sua curvatura, em comparação à amostra 0 (máscara), sendo a amostra 2 (tratada a 135°C) maior do que a amostra 3 (tratada a 145°C). Tal fato indica que a estrutura em arco (Figura 1) foi possivelmente formada e, além disso, a amostra 2 pode ter gerado um resultado estrutural melhor do que a amostra 3, significando que o aumento da temperatura não está necessariamente atrelado a um melhor desempenho neste processo.

Amostras	Diâmetro [μm]
0. Máscara	1747
1. Referência	1744
2. <i>Reflow</i> – 135 °C	1766
3. <i>Reflow</i> – 145 °C	1762

Tabela 1 - Dados dos diâmetros máximos das lentes.

Com o perfil de profundidade da amostra 1 (lente de referência, sem *reflow*) com varredura de 1 mm, como mostra a Figura 5(a), pode ser observado que foram fabricadas estruturas de 1,4 μm usando o fotorresiste AZ-5214 e a metodologia proposta. Ao aumentar a distância de varredura do perfilômetro em 1 mm para as amostras 1, 2 e 3, foram obtidos os perfis da Figura 5(b), correspondentes aos anéis das lentes. A amostra 1 tem o formato similar a um quadrado, enquanto que a amostra 2 mantém a mesma quantidade de anéis que a amostra 1, porém tem um perfil de arco característico de uma lente convencional. Já a amostra 3 pode ser vista que a quantidade de anéis diminuiu significativamente e o seu perfil se comporta como uma “ponta de faca”.

Portanto, a Figura 5 mostra que o gráfico da amostra 2 apresenta a melhor curvatura. Diante disso, o melhor processo de fabricação encontrado dentre os analisados foi dessa amostra, com *reflow* de 135°C por 5 minutos, uma vez que o resultado obtido é o que mais se aproxima do desejado (ver Figura 1). Ademais, esse tipo de curvatura comprova que as lentes fabricadas são do tipo convergente plano-convexas (Huerta et. al., 2023).

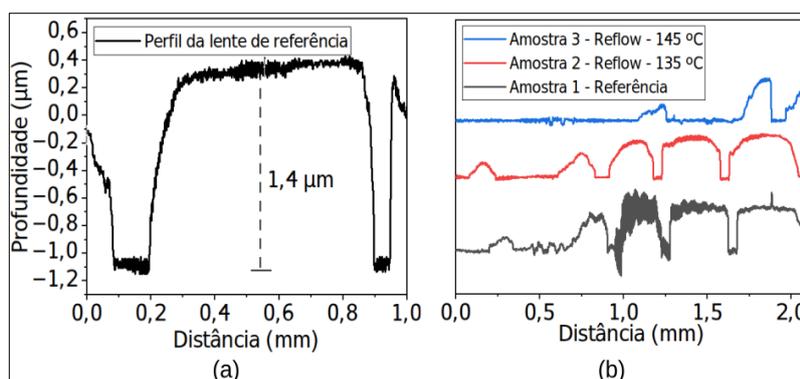


Figura 5: Gráficos da perfilometria mecânica de uma das lentes fabricadas. (a) amostra de referência. (b) amostra com *reflow* de 135°C por 5 minutos. (c) amostra com *reflow* de 145°C por 5 minutos.

A Figura 6 evidencia um comparativo da caracterização óptica (ver Figura 4), entre as amostras 1 e 3, bem como uma amostra 4 (lente de grafeno com *reflow* de 135°C). Pode ser observada uma notável redução de ruídos e maior definição dos anéis da caracterização óptica da amostra 2, comparado à amostra 1, reforçando a ideia de que a lente submetida à temperatura de 135°C teve um melhor desempenho. Esses resultados são ainda mais evidenciados ao usar um filme de grafeno nas estruturas, como mostra a Figura 6(c), de modo que essa amostra apresentou um ponto focal com intensidade de luz mais concentrada e anéis menos dispersos.

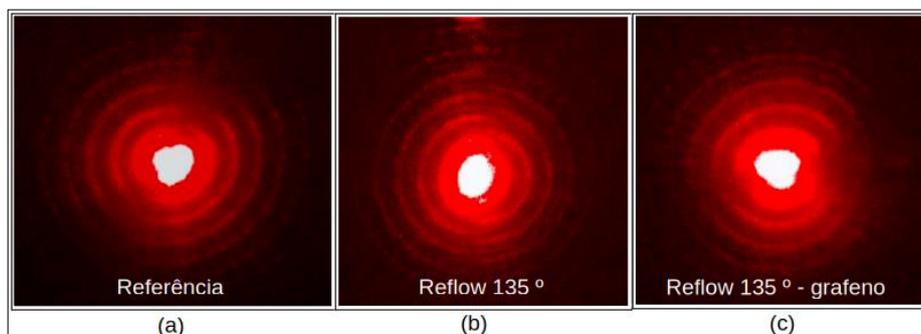


Figura 6: Imagens das caracterizações ópticas das lentes fabricadas. (a) amostra 1 - referência, (b) amostra 2 - com reflow de 135°C por 5 minutos. (c) amostra 4 - com filme de grafeno e reflow de 145°C por 5 minutos.

CONCLUSÕES:

Neste estudo, foi analisada a fabricação de microlentes convergentes plano-convexas por meio da técnica de *reflow* térmico e avaliou seus parâmetros estruturais e ópticos, para encontrar o melhor desempenho e, assim, desenvolver lentes baseadas em grafeno. No estudo inicial, três tipos de amostras foram analisadas: uma de referência sem tratamento térmico, e duas submetidas a tratamentos térmicos distintos (135 °C e 145 °C). Essas amostras foram submetidas à microscopia óptica, perfilometria mecânica e caracterização óptica com laser vermelho ($\lambda = 633 \text{ nm}$), examinando os parâmetros de largura dos anéis das lentes, perfil de profundidade e interferências ópticas.

Os resultados indicam que o *reflow* de 135 °C por 5 minutos obteve a melhor estrutura de arco, bem como desempenho óptico. Além disso, ao integrar o filme de grafeno na estrutura fabricada, o anel do ponto central ficou mais definido e os outros anéis menos dispersos, demonstrando uma melhoria considerável na eficiência óptica da lente.

Os próximos passos deste estudo propõem a integração da microlente com filme grafeno em sensores do tipo MSM (*Metal-Semiconductor-Metal*), visando avaliar a sua aplicabilidade em sistemas de mapeamento e sensoriamento.

BIBLIOGRAFIA

- HECHT, Eugene. **Optics**. 5. ed. Boston, Pearson Education, 2017.
- YUAN, Wei; LI, Li-Hua; LEE, Wing-Bun; CHAN, Chang-Yuen. Fabrication of Microlens Array and Its Application: A Review. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, Heidelberg, v. 31, n. 1, p. 1–9, 2018.
- KIM, Yumee; CHUN, Kukjin. Plano-convex lens fabrication for distance sensor based on single vision. **IEEE Xplore**, Auckland, pp. 1-3, 2019.
- SAMARCO. Microlens array fabrication. Disponível em <<https://www.samco.co.jp/en/processes/lscvd/teos-sio2/microlens-array.php>>. 2025.
- TALEBZADEH, S. N.; GOLMOHAMMADI, S.; TALEBZADEH, S. L. A review for graphene, graphene-based materials, and their applications in photonics and optoelectronic devices. **IEEE Xplore**, Tabriz, p. 1–5, 2024.
- HUERTA-CARRANZA, OLIVER, et al. "Simple method for evaluating plano-convex aspherical lenses." **Modeling Aspects in Optical Metrology IX**. Vol. 12619. SPIE, 2023.