cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Otimização do processamento de trilhas de grafeno induzido a laser por diodo visível de baixo custo: relações entre estrutura e propriedades elétricas

Vinícius Carvalho Morais[1]; Ricardo Aparecido Rodrigues de Oliveira[2], Inés Pereyra[1], Marcelo Nelson Páez Carreño[1].
[1]Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil
[2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São Paulo, SP, Brasil

Introdução

O grafeno induzido a laser (LIG) permite produzir estruturas condutoras diretamente em poliimida, dispensando transferência. Contudo, a velocidade de processamento afeta dimensões, morfologia, organização estrutural e propriedades elétricas. Com lasers de diodo visíveis e de baixo custo, a obtenção de trilhas uniformes e de baixa resistência depende da otimização desses parâmetros [1,2].

Objetivos

Investigar a influência da velocidade de varredura (50–600 mm/min) na formação de trilhas de LIG sobre poliimida, relacionando largura, morfologia, estrutura Raman e desempenho elétrico para identificar a condição de maior uniformidade e menor resistência de folha.

Metodologia

Trilhas fabricadas em Kapton com laser de diodo visível (λ = 405 nm; P = 500 mW), em passagem única. MEV: morfologia e 10 medidas de largura por trilha. Raman: quatro pontos analisados com excitação de 532 nm; estimativa da densidade de defeitos a partir de I_D/I_G [3]. Medidas elétricas: SMU Keysight B2902A, duas pontas, 1 mA e contatos de Au (200 nm).

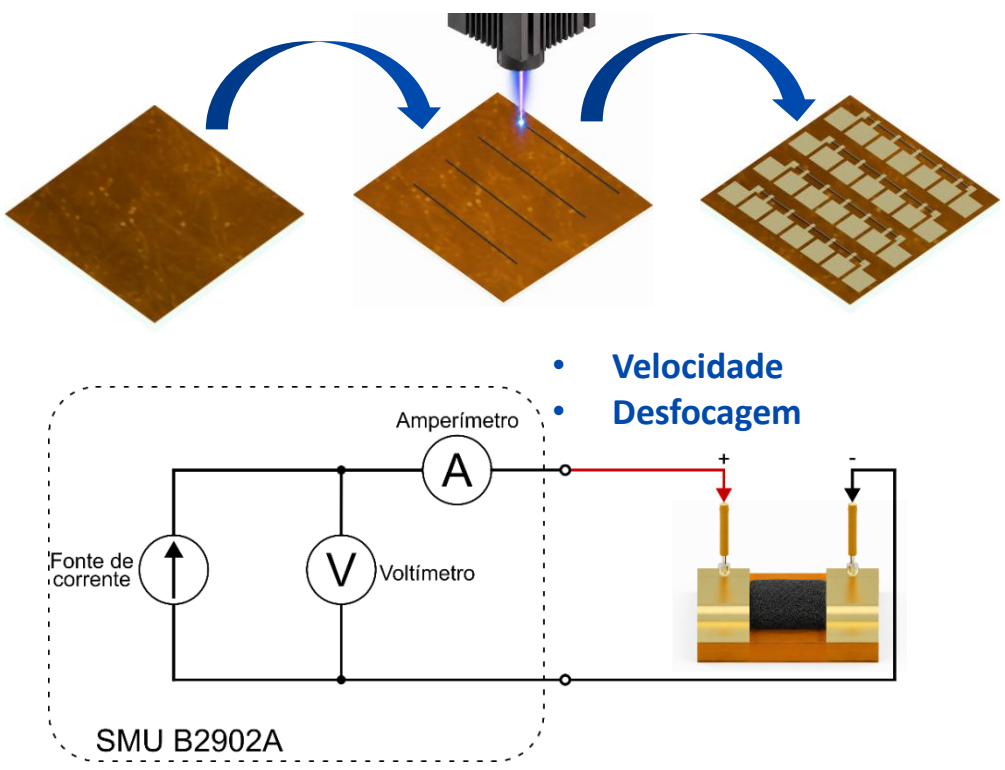


Figura 1 – Esquema da fabricação das trilhas de LIG sobre poliimida por laser visível e configuração de medição elétrica em duas pontas.

$$R(L) = \frac{R_{sh}}{W} L + 2R_c \qquad \text{(A)}$$

Resultados e Discussão

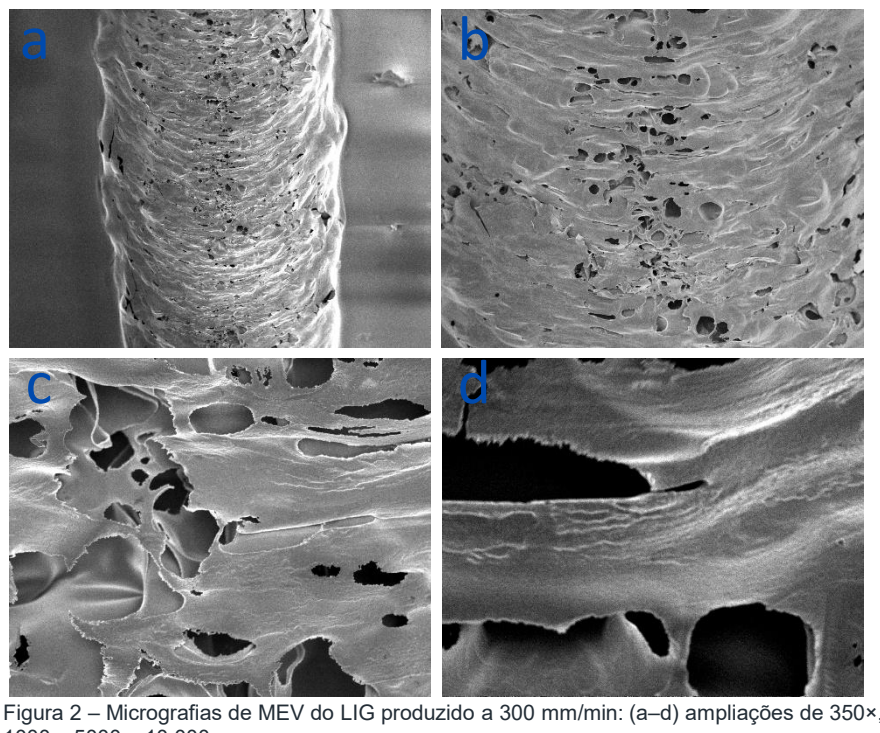


Figura 2 – Micrografias de MEV do LIG produzido a 300 mm/min: (a–d) ampliações de 350×, 1000x, 5000x 10.000×.

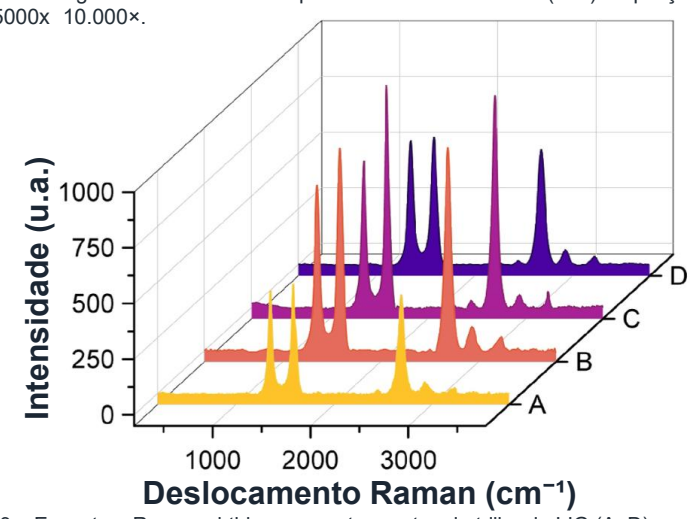


Figura 3 – Espectros Raman obtidos em quatro pontos da trilha de LIG (A–D).

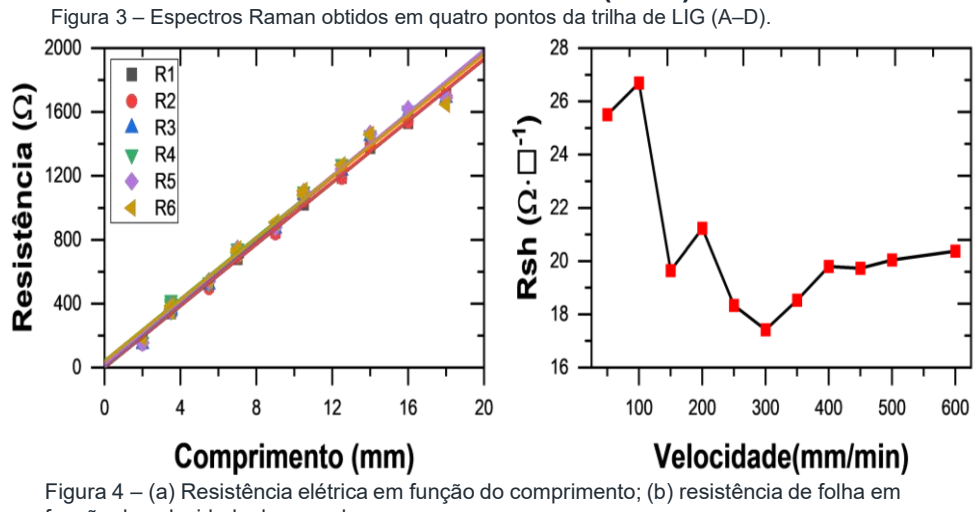


Figura 4 – (a) Resistência elétrica em função do comprimento; (b) resistência de folha em função da velocidade de varredura.

Rsh = 17,58 Ω/□ **Rc = 10,87 Ω**

Conclusões

A velocidade de 300 mm/min apresentou a menor resistência de folha (17,58 Ω/□)e largura média de 181,25 ± 5,35 µm. As seis séries R × L apresentaram inclinações próximas; assumindo contatos equivalentes, estimou-se Rc = 10,87 Ω por contato. O MEV revelou cavidades e feições lamelares. Os espectros Raman, com bandas D, G e 2D, são compatíveis com regiões de grafeno de poucas camadas e empilhamento turbostrático, com densidade média estimada de defeitos de ≈ 1,91 × 10^{11} cm^{-2}. Assim, 300 mm/min ofereceu o melhor compromisso entre uniformidade dimensional e desempenho elétrico.

Referências e Agradecimentos

[1] LIN, J. et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers. Nature Communications, v. 5, art. 5714, 2014. DOI: 10.1038/ncomms6714.

[2] YE, R.; JAMES, D. K.; TOUR, J. M. Laser-Induced Graphene. Accounts of Chemical Research, v. 51, n. 7, p. 1609–1620, 2018. DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00084.

[3] FERRARI, A. C.; BASKO, D. M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. Nature Nanotechnology, v. 8, p. 235–246, 2013. DOI: 10.1038/nnano.2013.46.

Agradecimentos: à CAPES pela bolsa de mestrado e ao Laboratório de Microeletrônica da USP (LME-USP) pelo apoio e infraestrutura.