

Título em Português:	Espectroscopia não-linear e processamento com pulsos ultracurtos de materiais fotônicos
Título em Inglês:	Nonlinear spectroscopy and ultrashort laser-processing of photonic materials
Autor:	Gabriele Cristine Felipe de Paula
Instituição:	Universidade de São Paulo
Unidade:	Instituto de Física de São Carlos
Orientador:	Cleber Renato Mendonça
Área de Pesquisa / SubÁrea:	Física da Matéria Condensada
Agência Financiadora:	USP - Programa Unificado de Bolsas

Espectroscopia não-linear e processamento com pulsos ultracurtos de materiais fotônicos

Gabriele Cristine Felipe de Paula

Prof. Doutor Cleber Renato Mendonça

Universidade de São Paulo

gabrielefelipep@usp.br

Objetivos

Estudo da poliimida kapton na microfabricação de linhas finas e grafeno induzido por laser(LIG), usando laser de femtossegundos nos comprimentos de ondas de 343 nm e 1030 nm.

Métodos e Procedimentos

O método de dano zero foi empregado para determinar a curva de incubação da poliimida. Nesse método, linhas são traçadas com diferentes energias sobre a superfície do material. A energia por pulso é dada por $E_p = \bar{p}/f$, e o raio limiar R_{th} relaciona-se a E_p e à energia de limiar E_{th} . A partir do dano superficial, calcula-se a fluência de limiar $F_{th} = (2E_{th})/[\pi(\omega_0)^2]$, em J/cm².

Foram irradiados grupos de linhas variando potência e número de pulsos, permitindo determinar o raio do feixe(ω_0) e o número de pulsos incidentes $N_p \approx 1.25f\omega_0/v$, com f sendo a taxa de repetição do laser e v a velocidade da amostra.

Com os valores de F_{th} e N_p , construiu-se a

curva de incubação, que descreve o efeito de memória associado ao acúmulo de defeitos em dielétricos. Esse comportamento é modelado pela equação:

$$F_{th}(N_p) = F_{th}(\infty) + [F_{th}(1) - F_{th}(\infty)]e^{-k(N_p-1)}$$

onde $F_{th}(1)$ é a fluência de limiar para um pulso, $F_{th}(\infty)$ para infinitos pulsos e k o parâmetro de incubação.

Resultados

A absorbância da poliimida kapton foi medida em função do comprimento de onda. Como o material apresenta alta absorbância em torno de 500 nm, atingindo inclusive um comportamento de saturação nessa faixa espectral. Esse resultado indica que, para comprimentos de onda próximos a 500 nm, o material absorve a maior parte da radiação incidente, o que pode influenciar diretamente nos processos de interação luz-matéria e, consequentemente, na eficiência do processamento a laser.

Os resultados da medida da absorbância indicam que, no comprimento de onda utilizado, a microfabricação pode ser realizada com baixas energias. Isso possibilita a criação

de linhas finas com alta precisão, como demonstrado na figura 1.

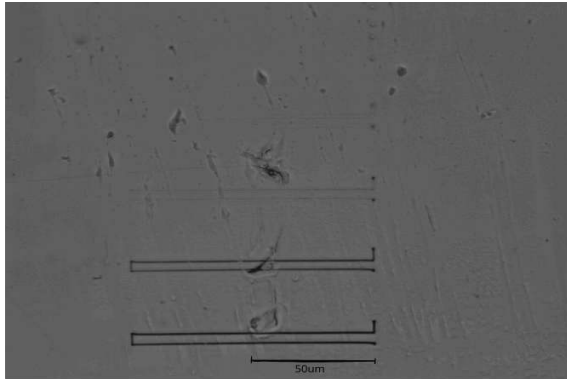


Figura 1: Imagem de MEV das linhas micro fabricadas com energias distintas a 343 nm.

Para possibilitar a microfabricação das linhas finas observadas, foi necessário calcular a cintura de feixe gaussiano (ω_0), que corresponde ao ponto focal do feixe laser. Ao focalizar o feixe nesse ponto, torna-se possível induzir modificações no material com baixas energias, permitindo assim a determinação da menor energia necessária para iniciar o processo de alteração da amostra.

O cálculo do ω_0 e da energia de limiar de dano foi realizado utilizando o método de dano zero. O valor obtido para ω_0 foi aproximadamente $(1,03 \pm 0,05) \times 10^{-5} \text{m}$, próximo do valor esperado (~ 1), considerando a objetiva utilizada. Já a E_{th} encontrada foi $(0,52 \pm 0,06) \text{ nJ}$.

O parâmetro de incubação k indica a intensidade do acúmulo de defeitos no material. Para k igual a 0, não há dependência do número de pulsos, resultando em um plateau. Valores maiores de k reduzem o número de pulsos necessários para atingir o plateau, enquanto valores menores indicam maior robustez do material. Usando a equação de $F_{th}(N_p)$ para fazer o fitting da figura 2 foi encontrado $F_{th}(\infty)$, $F_{th}(1)$ e k sendo $(0,0226 \pm 0,00441) \text{ J/cm}^2$, $(0,522 \pm 0,153) \text{ J/cm}^2$ e $(0,013 \pm 0,004)$, respectivamente. É observado no gráfico que a

curva só satura a partir dos 1000 pulsos, sendo um resultado de parâmetro de incubação condizente com o material usado já que a poliimida é um manômetro que contém um grupo de imida pertencentes à classe de plásticos de alto desempenho.

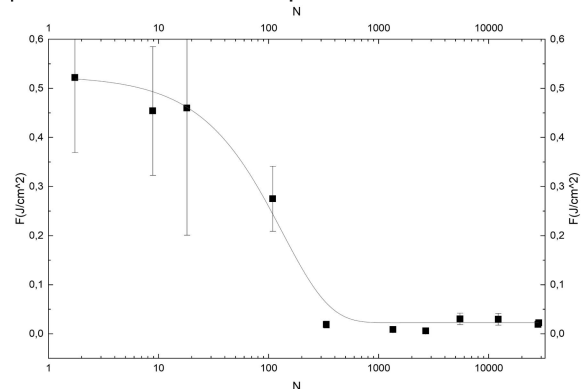


Figura 2: Gráfico do efeito de incubação, fluência de limiar calculada experimentalmente (quadrados pretos) e melhor ajuste aos dados (linha vermelha)

Conclusões

Os resultados são condizentes com o material usado já que a poliimida é um manômetro que contém um grupo de imida pertencentes à classe de plásticos de alto desempenho. Só será possível ver se foi formado grafite com os resultados da medida do raman.

Referências

1. STUART, B. C. et al. *Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics*. Physical Review B (1996).
2. Lin J, Peng Z, Liu Y, et al. *Laser-induced porous graphene films from commercial polymers*, nature. Communications 2014;5:5–12.
3. CUNHA, Renan et al. *Femtosecond laser-induced microstructuring and color centers in silicon carbide*. Ceramics international, 2025.
4. CRUZ, Carlos Henrique de Brito.; FRAGNITO, Hugo Luis. *Fenômenos Ultra Rápidos: geração de pulsos laser ultracurtos e suas aplicações*.

Nonlinear Spectroscopy and Processing with Ultrashort Pulses of Photonic Materials

Gabriele Cristine Felipe de Paula

Prof. Doutor Cleber Renato Mendonça

University of São Paulo

gabrielefelipep@usp.br

Objectives

Study of Kapton polyimide in the microfabrication of fine lines and laser-induced graphene (LIG), using femtosecond lasers at wavelengths of 343 nm and 1030 nm.

Materials and Methods

The zero-damage method was employed to determine the incubation curve of polyimide. In this approach, lines are inscribed on the material surface under different pulse energies. The energy per pulse is given by $E_p = \bar{p}/f$, and

the threshold radius R_{th} it is related to E_p and the threshold energy E_{th} . From the surface damage, the threshold fluence is calculated:

$$F_{th} = (2E_{th}) / [\pi(\omega_0)^2], \text{ em J/cm}^2.$$

Groups of lines were irradiated while varying the power and the number of pulses, allowing the determination of the beam radius (ω_0) and the number of incident pulses $N_p \approx 1.25f\omega_0/v$, where f is the laser repetition rate and v is the sample velocity.

Using the values of F_{th} and N_p The incubation curve was constructed, which describes the memory effect associated with defect accumulation in dielectrics. This behavior is

modeled by the equation:

$$F_{th}(N_p) = F_{th}(\infty) + [F_{th}(1) - F_{th}(\infty)]e^{-k(N_p-1)}$$

where $F_{th}(1)$ is the threshold fluence for a single pulse, $F_{th}(\infty)$ is the threshold for an infinite number of pulses, and k is the incubation parameter.

Results

The absorbance of Kapton polyimide was measured as a function of wavelength. The material exhibits high absorbance around 500 nm, even reaching a saturation behavior in this spectral range. This result indicates that, for wavelengths near 500 nm, the material absorbs most of the incident radiation, which can directly influence light-matter interaction processes and, consequently, the efficiency of laser processing.

The absorbance measurements indicate that, at the wavelength used, microfabrication can be performed with low energies. This enables the creation of fine lines with high precision, as shown in Figure 1.

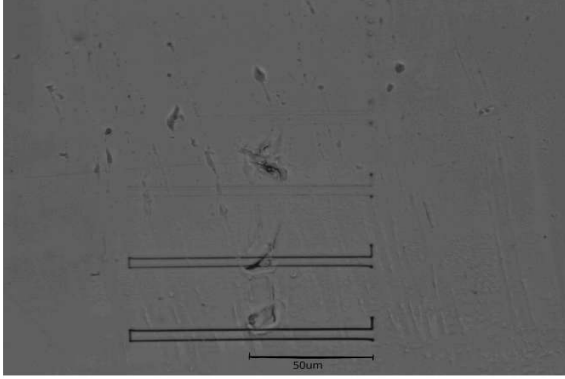


Figure 1: SEM image of the microfabricated lines at different energies at 343 nm.

To enable the microfabrication of the observed fine lines, it was necessary to calculate the Gaussian beam waist (ω_0), which corresponds to the focal point of the laser beam. By focusing the beam at this point, it becomes possible to induce material modifications with low energies, thus allowing the determination of the minimum energy required to initiate the alteration process in the sample.

The calculation of ω_0 and the damage threshold energy was carried out using the zero-damage method. The obtained value for ω_0 was approximately $(1.03 \pm 0.05) \times 10^{-5}$ m, close to the expected value (~ 1), considering the objective lens used. The threshold energy E_{th} was found to be (0.52 ± 0.06) nJ.

The incubation parameter k indicates the intensity of defect accumulation in the material. For k equal 0, there is no dependence on the number of pulses, resulting in a plateau. Higher k values reduce the number of pulses required to reach the plateau, whereas lower values indicate greater material robustness. Using the $F_{th}(N_p)$ equation to fit Figure 2, the values obtained were $F_{th}(\infty)$, $F_{th}(1)$ e k being so, $(0.0226 \pm 0.00441) J/cm^2$, $(0.522 \pm 0.153) J/cm^2$ e (0.013 ± 0.004) , respectively. It is observed in the graph that the

curve only saturates after 1000 pulses, which is consistent with the incubation parameter expected for the material used, since polyimide is a polymer containing imide groups belonging to the class of high-performance plastics.

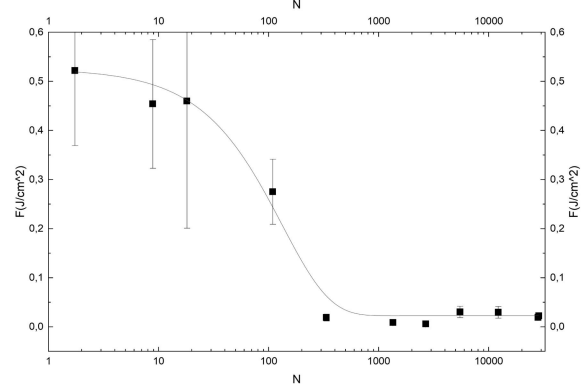


Figure 2: Incubation effect graph, experimentally calculated threshold fluence (black squares) and best fit to the damage data (red line).

Conclusions

The results are consistent with the material used, since polyimide is a polymer containing imide groups belonging to the class of high-performance plastics. Whether graphite has formed can only be determined from the Raman measurement results.

References

1. STUART, B. C. et al. *Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics*. Physical Review B (1996).
2. Lin J, Peng Z, Liu Y, et al. *Laser-induced porous graphene films from commercial polymers*, nature. Communications 2014;5:5–12.
3. CUNHA, Renan et al. *Femtosecond laser-induced microstructuring and color centers in silicon carbide*. Ceramics international, 2025.
4. CRUZ, Carlos Henrique de Brito.; FRAGNITO, Hugo Luis. *Fenômenos Ultra Rápidos: geração de pulsos laser ultracurtos e suas aplicações*.