

Determinação do Parâmetro Confocal de um Feixe Laser por Meio da Técnica do Z-Scan

R. E. Samad* e N. D. Vieira Jr.
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Caixa Postal 11049, 05422-970 São Paulo, SP, Brasil

Procurou-se explorar a técnica da Varredura Z (Z-Scan) para medida de não-linearidades cúbicas, para obtenção do valor do parâmetro confocal do feixe utilizado na técnica. Para isto utilizou-se acetona, de fácil utilização em qualquer laboratório. Encontramos um efeito aparentemente térmico que reproduz uma curva similar àquela prevista pela teoria da Varredura Z, baseada em não-linearidade devida à susceptibilidade de terceira ordem, porém fornecendo-nos parâmetros que discordam desta teoria. Mesmo assim pode-se medir o parâmetro de interesse, efetuando-se apenas uma pequena modificação da teoria original.

INTRODUÇÃO

Para a compreensão dos processos fundamentais que envolvem defeitos pontuais em matrizes sólidas, métodos espectroscópicos lineares^[1] (absorção, emissão, tempo de decaimento, níveis de energia, ...) fornecem os parâmetros básicos que caracterizam tais defeitos. Além disso, processos não-lineares^[2] (autoabsorção, absorção de estado excitado, transferência de energia, ...) têm um papel preponderante em estudos de viabilidade de candidatos a meios laser ativos, pois nesta condição o material encontra-se sujeito a altas densidades de campos eletromagnéticos, propiciando a ocorrência de efeitos não-lineares.

Um dos possíveis tratamentos para o formalismo da óptica não-linear é o das susceptibilidades não-lineares. Neste formalismo, a polarização do meio é descrita como uma série de potências do campo elétrico, onde os coeficientes desta série são as susceptibilidades^[2], sendo o coeficiente da n-ésima potência do campo elétrico denominado susceptibilidade de n-ésima ordem. Tais susceptibilidades decorrem da estrutura eletrônica e molecular do meio, podendo ser calculadas via mecânica quântica, e seu estudo fornece informações sobre essa estrutura.

De particular interesse entre os fenômenos não-lineares estão os denominados *efeitos de ação própria* ("Self-Action Effects") originários da susceptibilidade não-linear de terceira ordem ($\chi^{(3)}$), nos quais a interação não-linear da luz com o meio modifica, também de forma não-linear, as características de propagação da onda eletromagnética neste meio.

Experimentalmente esta susceptibilidade pode ser medida por meio de diversos métodos, dentre os quais citamos interferometria não-linear^[3], mistura de quatro ondas degeneradas^[4], mistura de três ondas quase degeneradas^[5] e rotação de elipse^[6], entre outras. A desvantagem de tais técnicas encontra-se principalmente na necessidade de um arranjo experimental complexo, que

necessita grande estabilidade mecânica, além de ser necessária uma amostra com a susceptibilidade não-linear conhecida para comparação, i. e., obtêm-se susceptibilidades não-lineares relativas à de uma amostra já caracterizada.

Por outro lado, a susceptibilidade de um meio determina sua constante dielétrica^[7] e conseqüentemente seu índice de refração total, que passa a ser descrito como $n = n_0 + \Delta n$, onde n_0 é o índice de refração usual, e Δn é a variação do índice de refração total. Este por sua vez é proporcional à intensidade da luz incidente sobre o meio com coeficiente n_2 , que por sua vez é proporcional à susceptibilidade de terceira ordem. Desta forma, se conseguirmos medir este coeficiente n_2 estaremos realizando uma medida da susceptibilidade de terceira ordem.

A técnica da Varredura Z (Z-Scan) recentemente introduzida^[8] permite que se efetue tal medida com um arranjo experimental simples, e sem a necessidade de uma amostra para comparação, e baseia-se na transformação de uma variação de fase da frente de onda de um feixe laser em variação de intensidade. Utilizando o arranjo experimental e a teoria da técnica de Varredura Z, também é possível determinar o parâmetro confocal^[9] do feixe incidente sobre a amostra, sendo necessário apenas realizar uma varredura para determinação da não-linearidade, como será exposto a seguir.

TEORIA

A montagem experimental para o método da Varredura Z encontra-se esquematizada na figura 1. Os dois detectores são necessários para eliminarmos as variações lineares do sinal ao calcularmos a razão D_1/D_2 . A amostra é excursionada através de um feixe laser no modo TEM₀₀^[9] (perfil gaussiano) com uma cintura que

varia de acordo com a expressão 1, onde w_0 é a cintura do feixe, $z_0 = kw_0^2/2$ o seu parâmetro confocal, e k seu vetor de onda.

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + z^2/z_0^2 \right) \quad (1)$$

À medida que a amostra aproxima-se da cintura do feixe a intensidade por unidade de área aumenta, induzindo a resposta não-linear do meio, o que resulta numa variação de seu índice de refração total. Se a amostra possui n_2 positivo, a região do feixe com maior intensidade (centro) experimenta um índice de refração total maior que as regiões com menor intensidade (bordas), e assim a

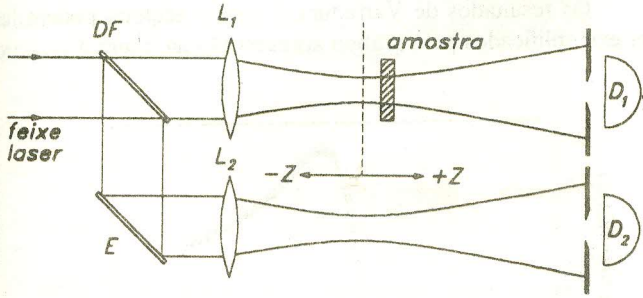


Figura 1 : esquema da montagem. DF é um divisor de feixe, L_1 e L_2 são lentes idênticas, e D_1 e D_2 são detectores idênticos.

amostra comporta-se analogamente a uma lente convergente. Se esta "lente convergente" encontra-se antes da cintura do feixe, a potência luminosa que atravessará a íris localizada no campo distante, será diminuída; por outro lado, se a amostra encontra-se depois da cintura, a potência que atravessa a íris aumentará, produzindo uma curva análoga à da figura 2. Se a amostra possuir índice de refração não-linear negativo, a curva será invertida.

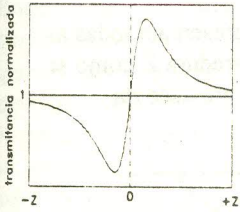


Figura 2 : Simulação da curva de Varredura Z para uma amostra com índice de refração não-linear positivo

Para analisarmos a curva obtida, partiremos das equações para variação da intensidade e da fase não-linear no interior da amostra, admitindo que a amostra é fina, ou seja, o diâmetro do feixe não muda em seu interior :

$$\frac{dI}{dz'} = -\alpha I \quad (2)$$

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dz'} = -\Delta n(I)k \quad (3)$$

onde z' é a coordenada no interior da amostra, α é o seu coeficiente de absorção linear, $\Delta\phi$ é a fase não-linear. A resolução das equações acima conduz a :

$$\Delta\phi = -kn_2 |E(z,r,t)|^2 \cdot (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha \quad (4)$$

onde $E(z,r,t)$ é o campo elétrico do laser, que possui perfil gaussiano, e o último termo da expressão é o comprimento efetivo da amostra. Deve-se ressaltar que a fase acumulada possui perfil gaussiano. Por conveniência, como será visto, definiremos $\Delta\phi_0$:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2(z)}} \quad (5)$$

sendo r a distância ao eixo do feixe. Se multiplicamos agora o campo no plano de entrada da amostra pela absorção linear, e pelo termo de fase não-linear acumulada, obtém-se o campo elétrico em seu plano de saída. Utiliza-se agora o método da Decomposição Gaussiana^[10] (GD) da fase acumulada, que consiste em expandir a frente de onda modificada pela fase não-linear numa somatória de feixes gaussianos, cuja lei de propagação é bem conhecida^[9]. Em seguida propaga-se, por meio da lei ABCD^[9], cada um destes feixes por uma distância d , até a íris, onde recalcula-se a somatória. Neste ponto é conveniente fazer duas aproximações : 1) a fase não-linear introduzida é pequena, de modo que na somatória podem ser desprezados termos de ordem $\Delta\phi^2$ e superiores; 2) a abertura da íris é pequena, podendo ser feita a aproximação $r \approx 0$. Com isto, a transmitância normalizada através da amostra pode ser escrita como:

$$T = \frac{|E_I(z,r=0,\Delta\phi_0)|^2}{|E_I(z,r=0,\Delta\phi_0=0)|^2} \quad (6)$$

onde E_I é o campo elétrico sobre a íris, e $\Delta\phi_0$ foi definido na equação 5. Considerando agora que o parâmetro confocal do feixe, z_0 , é muito menor que a distância de propagação da amostra à íris ($z_0/d \ll 1$), chega-se a uma expressão analítica para a curva de transmitância normalizada da Varredura Z :

$$T(z,\Delta\Phi_0) = 1 - \frac{4\Delta\Phi_0 x}{(x^2+1)(x^2+9)} \quad (7)$$

onde :

$$\Delta\Phi_0 = -kn_2 L_{ef} E^2(z=0,r=0,t) \quad (8)$$

é o deslocamento de fase no eixo óptico, L_{ef} é o seu comprimento efetivo, e $x = z/z_0$.

Partindo da equação 7 acima é fácil demonstrar que a distância entre pico e vale é dada por :

$$\Delta z_{p-v} = 1,72z_0 \quad (9)$$

e a variação da transmitância normalizada entre estes pontos será :

$$\Delta T_{p-v} = 0,406\Phi_0 \quad (10)$$

PARTE EXPERIMENTAL

O arranjo experimental utilizado segue o esquema da figura 1, porém, antes do divisor de feixe existe um modulador de feixe (*chopper*) para possibilitar a técnica de medida AC, e um telescópio composto por duas lentes, uma divergente de foco $f=-100\text{mm}$ e outra convergente com $f=200\text{mm}$, separadas de 10cm , para se obter um controle do perfil espacial do feixe. As lentes L_1 e L_2 , convergentes, possuem $f=200\text{mm}$ e encontram-se posicionadas a aproximadamente 30cm do telescópio. À frente de cada iris foi posicionada uma lente convergente de foco 100mm e diâmetro 50mm , possibilitando assim coletar a luz do laser para grandes aberturas da iris, focalizando esta luz sobre 2 detectores de PbS, idênticos. A distância entre as lentes L_1 e L_2 e cada uma das iris foi de 80cm , garantindo a condição de campo distante. Para efetuar o deslocamento da amostra sobre o feixe utiliza-se um translador acionado por motor de passo marca *Klinger*, com curso de 200mm e passo de $10\mu\text{m}$, interfaceado por microcomputador. Os sinais provenientes dos detectores são lidos por dois equipamentos tipo Lock-In, sendo que aquele que lê a referência fornece um sinal DC proporcional a esta, que é injetado no segundo Lock-In, que então realiza a normalização dos sinais, eliminando flutuações lineares, resultando num sinal DC proporcional à transmitância normalizada, que por sua vez é processado no microcomputador, que produz uma curva do tipo transmitância por deslocamento. Para as medidas aqui apresentadas utilizou-se um laser de Nd:YAG funcionando em modo CW em $\lambda=1,064\mu\text{m}$, em modo TEM₀₀ com uma potência de aproximadamente 1W , que era variada por meio da inclusão de espelhos de reflectâncias variadas no caminho do feixe. Como meio não-linear utilizou-se uma cubeta de vidro, com caminho óptico interno de 1mm , contendo acetona, que apresenta uma não-linearidade bem superior à de cristais, servindo para calibração do sistema.

Para efetuarmos a análise dos dados utilizamos uma variação da expressão 7 : à frente da expressão inclui-se um termo de amplitude, pois a razão dos sinais dos detectores não é necessariamente igual a 1; a variável x passa a ser definida por $x=(z-x_0)/z_0$, pois a origem do translador não coincide necessariamente com a cintura do feixe laser. Uma vez obtida a curva de Varredura Z, realiza-se um ajuste de função por meio do método de Gauss-Marquardt^[11] de ajuste de funções não-lineares nos parâmetros, obtendo-se assim estes quatro parâmetros de interesse: Amplitude e centro de simetria, que servem para normalização da

função, e deslocamento de fase e parâmetro confocal, que são os parâmetros físicos de interesse.

Com base nesta teoria, é possível a determinação do parâmetro confocal do feixe utilizado para estudo da amostra, pois como pode-se ver na expressão 9, a distância pico-vale não depende do deslocamento de fase, ou seja, não depende da amostra utilizada, de modo que qualquer meio não-linear pode fornecer-nos este parâmetro. Dentre os meios não-lineares por nós utilizados, foi escolhida a acetona como material não-linear para medida de parâmetro confocal.

Os resultados de Varredura Z para a acetona podem ser exemplificados pelo gráfico apresentado na figura 3.

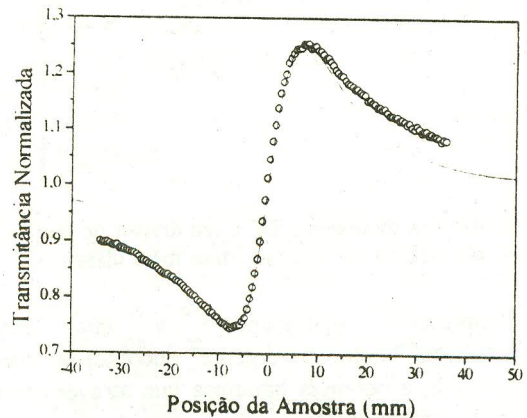


Figura 3 : Curva de Varredura Z, já normalizada, para acetona (laser em $\lambda=1,064\mu\text{m}$, CW). Os círculos representam o resultado experimental, e a linha contínua é o ajuste, que fornece uma fase de $\Delta\Phi_0=-1,253$ e parâmetro confocal igual a $z_0=8,07\text{mm}$.

As curvas obtidas com a acetona apresentam todas as características correspondentes a uma Varredura Z como se observar na figura 4, onde é confirmada a previsão da

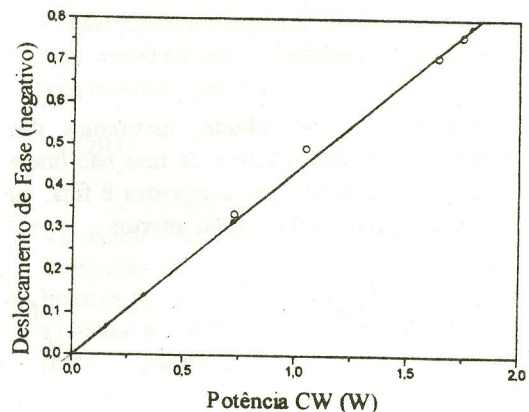


Figura 4 : curva de linearidade do deslocamento de fase com a potência incidente na amostra para uma abertura de iris de 4mm .

expressão 8, que estabelece que o deslocamento de fase deve variar linearmente com a potência incidente sobre a amostra. Verificou-se também que o parâmetro confocal medido por este método não é alterado com a variação da intensidade incidente sobre a amostra, o que nos levou a calcular uma média ponderada dos parâmetros confocais obtidos numa série de medidas, fornecendo-nos o resultado $z_0 = 8,082 \pm 0,015 \text{ mm}$. Para confirmar nosso resultado, efetuamos uma medida do parâmetro confocal do feixe por meio do método conhecido como "Knife-Edge"^[12], onde mede-se o diâmetro do feixe laser em várias posições bloqueando-se progressivamente o feixe com uma lâmina, obtendo assim uma curva de potência incidente num detector, e em seguida, de posse do valor destes diâmetros realiza-se um ajuste da expressão 1. Pode-se ver gráficos correspondentes a este método na figura 5.

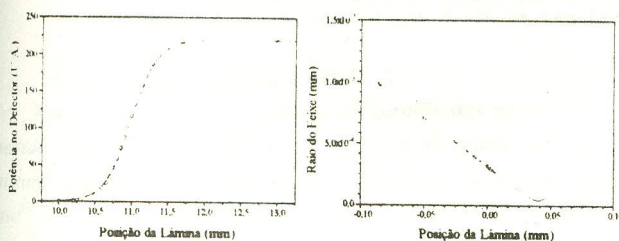


Figura 5: à esquerda tem-se uma medida de raio de feixe na posição -25mm, fornecendo $w = 51,86 \mu\text{m}$, e à direita os dados resultam numa cintura de feixe $w_0 = 43,29 \mu\text{m}$.

A partir dos dados obtidos com este método, pode-se calcular um parâmetro confocal para o feixe, que vale $z_0 = 5,536 \pm 0,059 \text{ mm}$.

CONCLUSÕES

Ao compararmos os valores de parâmetro confocal obtidos pelos dois métodos aqui expostos, notamos uma grande discrepância entre os resultados. Como a curva da figura 3 não se ajusta perfeitamente aos dados obtidos, e o segundo método (Knife-Edge) mede diretamente a cintura do feixe, verificamos que este resultado é mais confiável. Ao calcularmos uma estimativa da susceptibilidade não-linear da acetona, partindo da expressão 10, com os dados aqui apresentado encontramos um valor aproximadamente 10^7 vezes maior que os apresentados na literatura, o que nos levou à conclusão que o efeito medido por nós na varredura Z não é um efeito não-linear devido à susceptibilidade não-linear de terceira ordem, e sim um efeito térmico que causa uma variação do índice de refração total da acetona, porém não seguindo à risca a teoria da Varredura Z, fornecendo assim um parâmetro confocal que não corresponde ao real, dentro desta teoria.

Contudo, devido a resultados anteriores por nós obtido, verificou-se que, para a acetona, se reescrevermos a expressão 9 como $\Delta z_{p-v} = 2,48z_0$ obtemos o parâmetro confocal do feixe.

Como a técnica da Varredura Z foi utilizada aqui para determinarmos o parâmetro confocal do feixe, nossos objetivos foram cumpridos. Contudo estamos procedendo numa análise mais cuidadosa dos dados obtidos com o objetivo de esclarecer qual é o fenômeno térmico medido, e se possível desenvolver um modelo que o descreva.

REFERÊNCIAS

1. Di Bartolo, B., "Optical Interactions in Solids", John Wiley & Sons, Inc, New York, 1984
2. Shen, Y. R., "The Principles of Nonlinear Optics", John Wiley & Sons, Inc, New York, 1968
3. Weber, J., Milam, D. and Smith, W. L., "Nonlinear Refractive index of Glasses and Crystals", *Opt. Eng.*, **17**, pp. 463-469 (1978)
4. Friberg, S. R. and Smith, P. W., "Nonlinear Optical Glasses for Ultrafast Optical Switches", *IEEE J. Quantum Elec.*, **QE-23**, pp. 1089-1094 (1987)
5. Adair, R., Chase, L. L. and Payne, S. A., "Nonlinear Refractive Index Measurement of Glasses Using Three Wave frequency Mixing", *J. Opt. Soc. Amer. B.*, **4**, pp. 875 (1987)
6. Owyong, A., "Ellipse Rotations Studies in Laser Host Materials", *IEEE J. Quantum Elec.*, **QE-9**, pp. 1064-1069 (1973)
7. Jackson, J. D., "Classical Electrodynamics", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1975
8. Bahae, M. S., Said, A. A., Wei, T., Hagan, D. J. and Van Stryland, E. W., "Sensitive Measurement of Optical Nonlinearities Using a Single Beam", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **QE-26**, pp. 760-769 (1990)
9. Yariv, A., "Quantum Electronics", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1989
10. Weaire, D., Wherret, B. S., Miller, D. A. B. and Smith, S. D. "Effect of Low-Power Nonlinear Refraction on Laser Beam Propagation in InSb", *Opt. Lett.*, **4**, pp. 331-333 (1974)
11. Marquardt, D. W., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters", *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, **11**, pp. 431-441 (1963)
12. Khosrofiyan, J. M. and Garetz, B. A., "Measurement of a Gaussian Laser Beam Diameter Through the Direct Inversion of Knife-Edge Data", *Appl. Opt.*, **22**, pp.

*Bolsista de Mestrado FAPESP - processo 93/1367-0
Este trabalho contou com o apoio da FAPESP sob o auxílio 93/4999-7

SUMMARY

Using the Z-Scan Technique for measuring 3rd nonlinearities we have measured the confocal parameter of the exciting laser beam. Due to simplicity, acetone was used as a standard. We measured an apparently thermal effect that reproduces a similar curve predicted by the Z-Scan Theory, but we have obtained parameters that differ from this theory. In Spite of this we can measure the laser confocal parameter if we make a slight change in the original theory.