



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE APOIO À PESQUISA  
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS NÃO-LINEARES USANDO A TÉCNICA DE Z-  
SCAN

BOLSISTA: Nauana Kelly Lima Nonato, FAPEAM

MANAUS – 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE APOIO À PESQUISA  
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO FINAL  
PIB-E/0102/2011

ESTUDO DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS NÃO-LINEARES USANDO A TÉCNICA DE Z-  
SCAN

BOLSISTA: Nauana Kelly Lima Nonato, FAPEAM  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Adriano Cotta

MANAUS – 2012

## RESUMO

Estudo de propriedades ópticas específicas dos materiais usando uma técnica versátil e de fácil desenvolvimento, porém de profundo grau de conhecimento sobre perfil de feixes gaussianos. A técnica Z-Scan pode ser usada para diversos fins, sendo seu principal objeto de análise materiais para fabricação de fibras ópticas. Feixes gaussianos são aqueles cuja distribuição de intensidade é descrita por uma função gaussiana, e são os feixes de mais simples análise. O índice de refração e o coeficiente de absorção são as propriedades de objetivo de análise da técnica Z-Scan, e são obtidos através do gráfico de transmitância de uma amostra em função do eixo de deslocamento  $z$ . O desenvolvimento da técnica envolve três etapas, que são estudo teórico sobre feixes gaussianos e a técnica em si, experimentação de métodos para encontrar informações sobre o perfil do feixe gaussiano, e criação de um software de captura de dados de Z-Scan. O software de captura de dados, desenvolvido em .Net C#, possibilitará uma rápida e precisa medição da transmitância, que será calculada com base na medição da intensidade da luz do laser.

**Palavras-chave:** técnica Z-Scan, lasers, feixes gaussianos, .Net C#.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: perfil do feixe capturado pela câmera Coherent, e analisado pelo programa Beam Viewer.....	11
Figura 2: Protótipo do software de captura de dados.....	13

---

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1: gráfico do experimento usando a técnica de knife edge, relacionando a intensidade e a posição da lâmina no eixo y.....	10
Gráfico 2: intensidade do feixe do laser de argônio em função do raio do feixe.....	11

---

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: parâmetros obtidos usando a câmera Coherent através do programa BeamViewer.....	12
---	----

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1. Feixes gaussianos .....	7
2.2. Técnica Z-Scan .....	7
3. MÉTODOS UTILIZADOS .....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	10
5. CONCLUSÕES .....	14
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
7. CRONOGRAMA EXECUTADO .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo de técnicas de análise de materiais vem se tornando importante conforme a tecnologia se sofisticava. No caso do desenvolvimento de novos dispositivos ópticos, as propriedades a serem estudadas são fundamentalmente o índice de refração e o coeficiente de absorção óptica, para o caso, por exemplo, de fabricação de fibras óticas.

Os lasers são amplamente utilizados na óptica de materiais, pois as técnicas que os utilizam possuem grande sensibilidade e precisão, como a técnica Z-Scan, que é relativamente nova na óptica de materiais, e é uma técnica de alta sensibilidade, além de simples implantação. Um laser com perfil de distribuição gaussiana no modo TEM<sub>00</sub> é o melhor para ser usado em análises.

Para o desenvolvimento da técnica, primeiramente é necessário um estudo aprofundado a respeito de caracterização. Também é necessário um estudo de como retirar informações características de um feixe de laser.

O objetivo do projeto é implementar a técnica Z-Scan na região Norte, e futuramente utilizá-la para um estudo aprofundado de materiais de diferentes naturezas. No presente momento, a técnica tem como prioridade a análise de uma amostra constituída de um waffer de GaAs dopado do tipo N de carbono.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Feixes Gaussianos

O feixe geralmente emitido por lasers comerciais é aproximadamente gaussiano no modo TEM<sub>00</sub> (ordem zero), pois a distribuição radial de intensidade é gaussiana. Devido a essa característica, feixes gaussianos tem análise simplificada e muitas vezes são os mais desejados nas emissões de fontes laser. O perfil radial da intensidade é dado por:

$$I(r, z) = I_0 \exp[-2r^2/w(z)^2] \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $I_0$  é a intensidade de saída do laser,  $r$  é a variável que define o raio e  $w(z)$  é uma variável que define a posição de análise radial em função do deslocamento em  $z$  (distância da saída do laser ao ponto de análise).

Outra característica peculiar é que um feixe gaussiano diverge numa região onde o raio do feixe é menor, chamada cintura do feixe, e converge em torno dela. A convergência ou divergência do feixe é medida a partir de um ângulo  $\theta$  denominado *ângulo de divergência do feixe*. A medida desse ângulo é dada por:

$$d_1 = 4\lambda/\pi\theta \quad (\text{Equação 2})$$

onde  $d_1$  é o diâmetro do feixe e  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser.

O entendimento desse comportamento é facilitado quando a extensão da cintura do feixe é caracterizada por um parâmetro  $z_0$  chamado *dispersão de Rayleigh*, que pode ser expresso de múltiplas formas:

$$z_0 = \frac{d_1}{\theta} = \frac{4\lambda}{\pi\theta^2} = \frac{\pi d_1^2}{4\lambda} \quad (\text{Equação 3})$$

A dispersão de Rayleigh define a distância da cintura do feixe ao diâmetro aumentado em  $\sqrt{2d_0}$ .

### 2.2. A técnica Z-scan

A técnica Z-Scan é baseada no princípio de distorção espacial de um feixe. Usando um feixe de laser no modo TEM<sub>00</sub> (ordem zero), o qual possui distribuição de intensidade perfeitamente descrita por uma gaussiana, estreitamente focado por uma lente, mede-se a transmitância do meio não-linear (no caso, a amostra a ser analisada) por uma pequena

abertura no campo distância, e essa medida é feita do deslocamento  $z$  da amostra em torno do foco do feixe.

Para que possam ser medidos separadamente os parâmetros não-lineares índice de refração  $n_2$  e coeficiente de absorção  $\alpha$ , é preciso que sejam feitas duas medidas de Z-Scan, sendo que primeiramente a medida é feita com a abertura, para se determinar  $n_2$ , e a segunda medida é feita sem a abertura. Por ora, analisemos apenas como obter  $n_2$ .

Esta técnica pode ser desenvolvida em diferentes métodos, tais como: Z-scan em meios não-lineares, Z-scan de dois fótons, Z-scan resolvido no tempo e *eclipsing* Z-scan. A princípio será utilizado o Z-scan em meios não-lineares.

O efeito da não-linearidade da amostra pode ser analisado a partir da mudança de fase não-linear  $\Delta\Phi_0$  induzida pela intensidade do feixe, que é dada por  $\Delta\Phi_0 = k_0 n_2 I_0 L$ , onde  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  é o número de onda no vácuo (sendo  $\lambda_0$  o comprimento de onda do laser),  $I_0$  é a intensidade do laser e  $L$  é a espessura da amostra, considerando inicialmente o uso de amostras finas. A equação da transmitância normalizada é dada por:

$$T\left(\frac{z}{z_0}\right) = 1 - \frac{4\left(\frac{z}{z_0}\right)\Delta\Phi_0}{\left[\left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 1\right]\left[\left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 9\right]} \quad (\text{Equação 4})$$

onde  $z$  é a coordenada da amostra medida no plano focal e  $z_0$  é a dispersão de Rayleigh, levando-se em conta que  $|\Delta\Phi_0| = \pi$ .



### 3. MÉTODOS UTILIZADOS

Primeiramente, foi levantada uma base de dados a respeito de feixes gaussianos. Como pode ser visto na equação 4, para que a técnica Z-Scan possa ser utilizada, é preciso primeiro que o utilizador da técnica seja capaz de extrair as informações de um feixe. No caso do Z-Scan, as informações requeridas são necessariamente a largura do feixe, a largura do feixe na sua cintura e a distância da cintura do feixe à saída do laser. Para os experimentos iniciais, foi utilizado um laser de Argônio ajustado para um comprimento de onda  $\lambda = 514$  nm. Conhecendo os parâmetros que descrevem o feixe do laser, pode-se então estudar como a técnica Z-Scan funciona.

Para conhecer os parâmetros do feixe, foi a princípio utilizada uma técnica de caracterização chamada *knife edge*, onde uma lâmina interrompe uma parte da chegada de luz proveniente do laser no detector. Ao analisar o gráfico gerado de acordo com a intensidade da luz pela posição da lâmina, obtêm-se uma função gaussiana. Para chegar ao valor da largura do feixe, basta analisar a largura da gaussiana a meia altura da intensidade máxima. Para ter certeza do resultado, foi utilizada uma câmera especialmente desenvolvida para caracterização do perfil do feixe de um laser, modelo **Coherent Inc. LaserCam-HR (RoHS)**. A câmera vem acompanhada do software *Beam Viewer*, que analisa a captura da câmera e gera gráficos em três dimensões de intensidade, e outras informações, como o valor da largura do feixe de diferentes meios de análise, inclusive a técnica *knife edge*.

A técnica Z-Scan necessita de um deslocador para a captura de dados. Utilizamos o deslocador modelo **Newport UTS 5353**. Como não disponibilizamos de um software exclusivo para a captura de dados relacionados à técnica, também está em fase de desenvolvimento um software baseado na linguagem C# da plataforma .Net, sendo desenvolvido no *IDE Visual Studio*.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que possam ser realizadas medidas de Z-Scan, é primeiro necessário conhecer as informações do laser utilizado. Para isso, fizemos um experimento que se baseava em uma interrupção do feixe de laser ao longo de seu raio. Ao fazermos uma comparação da equação que descreve uma gaussiana com a equação que descreve a distribuição gaussiana de intensidade ao longo de um feixe de laser, podemos notar elementos de semelhança. A equação que descreve uma curva gaussiana:

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp\left[-2\frac{(x-x_0)^2}{w^2}\right] \quad (\text{Equação 5})$$

onde  $A$  é a área inicial de incidência de luz,  $w$  é a largura do feixe sem obstruções,  $x$  é o deslocamento radial da lâmina em direção ao centro do feixe, e  $y_0$  e  $x_0$  são valores de ajuste. Ao se fazer uma comparação da equação 1 com a equação 3, podemos ver o padrão de semelhança. Considerando que  $y_0$  e  $x_0$  são consideravelmente desprezíveis, uma vez que inicialmente a lâmina não obstrui o feixe de laser, e a intensidade inicial é bem definida, a equação 3 se transforma em:

$$y = \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp\left[-2x^2/w^2\right] \quad (\text{Equação 6})$$

Então, a partir daí, tomemos como base a equação 1 ( $I(r, z) = I_0 \exp[-2r^2/w(z)^2]$ ), e podemos concluir que realmente se trata de uma função gaussiana, em que  $y = I(r, z)$ , o termo  $\frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}}$  corresponde a  $I_0$ , e  $x$  equivale a  $r$ .

Com os dados da técnica anteriormente descrita como *knife edge*, pudemos comprovar esse resultado experimentalmente.

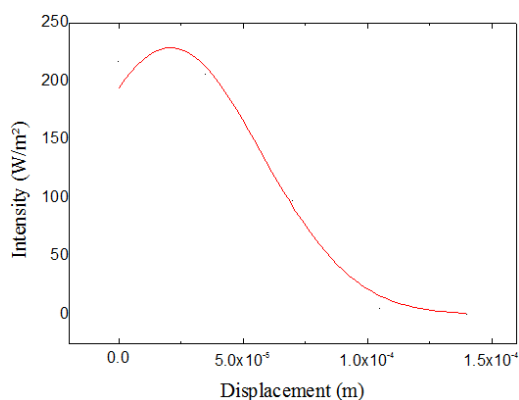


Gráfico 1: gráfico do experimento usando a técnica de knife edge, relacionando a intensidade e a posição da lâmina no eixo y.

A função demonstrada no gráfico 1 é descrita por:

$$I = 229,44 \exp\left[-2y^2/7,3 \cdot 10^{-8}\right] \quad (\text{Equação 7})$$

A partir da equação 7 obtemos para a largura do feixe um valor de 730  $\mu\text{m}$ , que é um valor aceitável, considerando que a incerteza calculada para este valor é da ordem de  $10^{-6}$ , e também ao visualizarmos o feixe a olho nu, o que vemos é na verdade o feixe já com muita dispersão.

Tendo um primeiro resultado partimos então para a confirmação, que é o uso da câmera. O feixe foi incidido diretamente na câmera, sem nenhum instrumento óptico nem filtro. O resultado obtido pode ser visualizado na figura 1.

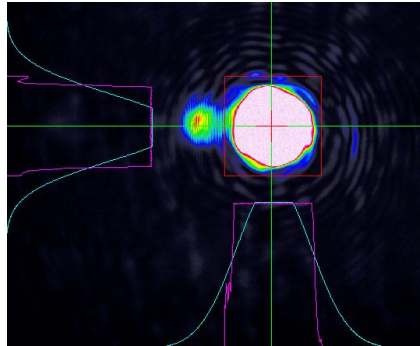


Figura 1: perfil do feixe capturado pela câmera Coherent, e analisado pelo programa Beam Viewer.

Pode-se ver na figura 1 que temos dois comportamentos suspeitos: uma possível reflexão ou interferência ao lado esquerdo do feixe, e uma região branca como se tivesse ocorrido uma saturação de luz. Para melhor análise, observemos o mesmo resultado num gráfico tridimensional:

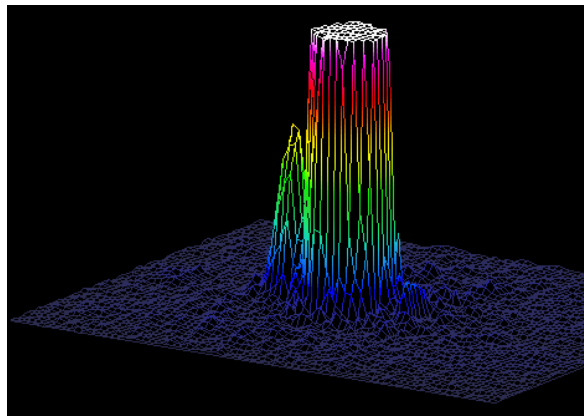


Gráfico 2: intensidade do feixe do laser de argônio em função do raio do feixe.

O resultado foi inesperado, uma vez que a região da mancha branca deveria possuir uma coloração avermelhada, já que quanto mais próximo do centro do feixe, maior é a intensidade de luz. A suspeita inicial, como dito anteriormente, é de que pode se tratar de uma saturação na lente da câmera. Observemos os dados obtidos pelo programa Beam Viewer (tabela 1).

<b>Dados obtidos do feixe do laser de Argônio</b>	
<b>Pico de intensidade</b>	7,7 mW/cm <sup>2</sup>
<b>Diâmetro do feixe</b>	1113,2 μm
<b>Diâmetro pela técnica <i>knife edge</i></b>	1481 μm

Tabela 1: parâmetros obtidos usando a câmera *Coherent* através do programa BeamViewer.

De acordo com os valores apresentados na tabela, podemos perceber que o valor para o raio do feixe do laser não está muito distante do valor que foi encontrado usando a técnica de *knife edge*. Entretanto, quando observamos o parâmetro diâmetro do feixe, que é uma medição direta, vemos uma divergência de valores, o que nos leva a propor que a mancha na imagem não se trata de uma simples saturação.

Após procurar informações técnicas a respeito da câmera, descobrimos que sua sensibilidade abrange apenas comprimentos de onda de valor igual ou superior a 633 nm. Conclui-se então que a mancha branca na imagem capturada corresponde a falta de capacidade do aparelho em operar sob o comprimento de onda do laser de argônio. Então, nos experimentos futuros, será utilizado um laser de hélio-neônio, cujo comprimento de onda é  $\lambda = 633$  nm.

Uma medida Z-Scan feita manualmente toma horas de trabalho, uma vez que o ajuste do deslocador deve ser muito preciso para que seja garantida a confiabilidade da medição. Para isso, está sendo desenvolvido um software que controla o deslocador através de comandos simples, possibilitando contínuos deslocamentos com alta precisão. O software está sendo desenvolvido na linguagem C#, e já é capaz de controlar o deslocador em escala manométrica. Entretanto, para que possa ser funcional, é preciso sincronizá-lo com as medidas capturadas pelos detectores.

Como a plataforma de desenvolvimento da linguagem é bastante visual, a interface do software está finalizada, conforme figura X, e o plano é que pouca coisa seja alterada. Está sendo estudada a possibilidade da troca da linguagem de programação para a linguagem python, a qual tem uma possibilidade maior de personalização. Mas, para um primeiro teste, o programa será finalizado em C#.

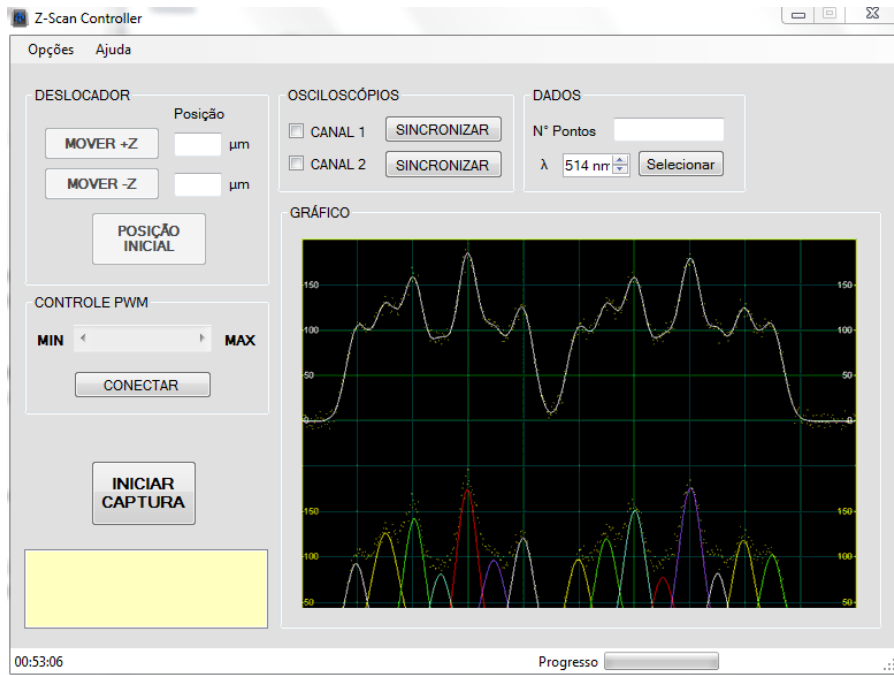


Figura 2: Protótipo do software de captura de dados.

## 5. CONCLUSÕES

Nesses primeiros nove meses de trabalho, foram apresentadas notações envolvendo feixes gaussianos, bem como se pode aprender a trabalhar com instrumentos ópticos. Também foram estudadas lógica e linguagens de programação, e alguns fundamentos de eletrônica.

Apesar do resultado dos primeiros experimentos não ter trazido o resultado esperado, pode-se aprender a retirar informações de um feixe através de experimentos simples de fácil montagem, e as técnicas aprendidas poderão ser utilizadas futuramente para outros fins.

Pelo fato de o projeto estar mais envolvido à automação da técnica do que a conceitos físico, a parte relacionada a instrumentação e software precisa ser mais explorada, uma vez que para fazer uma medida manualmente, são necessárias várias horas de trabalho, e o objetivo é justamente reduzir esse tempo.

A técnica Z-Scan em si ainda não foi testada, justamente por ser necessária a introdução de conceitos relacionados à mesma antes de sua utilização. Para isso, o projeto foi renovado e o período de trabalho foi estendido para mais um ano, sendo este ano exclusivamente dedicado à experimentação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O'SHEA, D.C., Elements of modern optics design. Wiley, New York (1985).
- [2] M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. H. Wei, D. J. Hagan, and E. W. Van Stryland, IEEE J. Quantum Electron. 26, 760 (1990).
- [3] YOUNG, M., Optics and Lasers, Including Fibers and Optical Waveguides, 5<sup>a</sup> ed., Springer, New York (2000).
- [4] L. Pálfavi, B. C. Tóth, G. Almási, J. A. Fülöp, J. Hebling. A general Z-scan theory, Applied Physics B. Springer-Verlag, 2009. 97, 679 (2009).
- [5] YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física IV: ótica e física moderna, 12<sup>a</sup> ed., Addison Wesley, São Paulo (2009).
- [6] CHAVES, Anderson Silva. Novos resultados teóricos e experimentais para a técnica Z-Scan / Anderson Silva Chaves; orientador Tomaz Catunda – São Carlos (2010).

## 7. CRONOGRAMA EXECUTADO

DESCRIÇÃO	OUT	NOV	DEZ	JAN 2011	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL
Estudo sobre feixes gaussianos	X	X	X							
Estudo sobre a técnica Z-scan		X	X	X						
Início na implementação da técnica com a construção do aparato experimental				X	○	○				
Calibração dos equipamentos						○	○			
Desenvolvimento do Software de captura de dados e controle								X	X	
- Elaboração do resumo e relatório final - Preparação da apresentação final para o Congresso										X