

REFRATÔMETRO POR HOLOGRAFIA COM LASERS MULTIMODO PARA ANÁLISE DE LÍQUIDOS

Eduardo Acedo Barbosa¹, Danilo Mariano da Silva^{1,2}, André de Oliveira Preto¹, Niklaus Ursus Wetter²

¹- Laboratório de Óptica Aplicada - Faculdade de Tecnologia de São Paulo

²- Centro de Lasers e Aplicações - IPEN

ebarbosa@fatecsp.br

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento e desempenho de um refratômetro holográfico para medida de líquidos. Através do registro holográfico com lasers multimodo, temos a formação de um comprimento de onda sintético e a modulação da intensidade da onda difratada em função da diferença do caminho óptico entre os feixes objeto e referência. No arranjo óptico, um porta-amostra transparente contendo o líquido foi posicionado no braço do feixe referência, e como objeto utilizou-se uma placa metálica inclinada, cuja imagem reconstruída surge coberta por franjas de interferência retas e paralelas. Uma alteração no caminho óptico ΔL no comprimento da coluna do líquido gera um deslocamento diretamente proporcional de Δp franjas sobre a imagem do objeto, de onde a relação do índice de refração é obtida. Os hologramas foram gravados em um cristal fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) e utilizou-se um laser de diodo multimodo emitindo em torno de 670 nm. Os resultados foram comparados com valores obtidos pelo refratômetro de Abbe.

Descritores: Índice de refração, holografia, cristais fotorrefrativos

ABSTRACT

The development and the performance of a holographic refractometer for liquid measurement is reported. Due to the multi-wavelength character of the holographic recording a synthetic wavelength was generated, and the diffracted wave intensity was thus modulated as a function of the optical path difference between the reference and the object beams. The transparent test cell containing the liquid was placed at the reference-beam arm of the optical setup, while the holographically reconstructed image of a tilted metallic bar used as object appeared covered of parallel, contour interference fringes. A change ΔL on the liquid column length is proportional to the Δp running fringes on the object image, and from this relation the refractive index of the test liquid was obtained. The holograms were recorded on a photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) crystal whether using a single multimode diode laser emitting at 670 nm. The results were compared with the ones obtained through an Abbe refractometer.

Keywords: Refractive index, holography, photorefractive crystals

INTRODUÇÃO

Medidas de índice de refração tornaram-se uma ferramenta importante para uma grande variedade de aplicações em diversas áreas do conhecimento, que vão da agricultura à indústria, incluindo também a produção científica, tecnológica e as aplicações médicas. Recentemente, observou-se um número crescente de técnicas de refratometria baseadas em fenômenos de interferência e difração, devido à elevada precisão obtida por meio desses fenômenos [1,2,3]. Dentre os métodos de difração e interferometria, a interferometria holográfica apresenta características interessantes, uma vez que normalmente permitem medições da amostra como um todo [4,5].

Este trabalho propõe um novo conceito de refratometria baseado na obtenção de imagens holográficas utilizando um cristal fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) como meio de registro e um laser de diodo vermelho emitindo simultaneamente vários modos longitudinais. Na montagem experimental o objeto é uma placa metálica plana inclinada em relação à face frontal do BTO em um ângulo arbitrário. O registro holográfico de vários hologramas no cristal gera franjas de contorno retas e paralelas na imagem holográfica do objeto segundo um comprimento de onda sintético λ_S . O feixe de referência, por sua vez, passa por uma célula de vidro contendo o líquido a ser analisado e com um espelho móvel em seu interior. Quando o espelho é transladado, o comprimento da coluna de líquido varia, mudando assim o caminho óptico do feixe referência [6]. Esta mudança de fase desloca as franjas de contorno na superfície do objeto, de modo que o movimento do espelho para um dado deslocamento de franjas é inversamente proporcional ao índice de refração do líquido.

A fim de avaliar a sensibilidade da técnica para pequenas variações no índice de refração, analisamos uma solução de água com diferentes concentrações de etanol. Além disso, as concentrações de NaCl em soluções salinas de água foram determinados pela comparação dos índices de refração medido com uma curva conhecida. Em ambos os casos, os resultados foram comparados com

os valores obtidos através de um refratômetro de Abbé comercial.

Registro holográfico com múltiplos comprimentos de onda/ medida do índice de refração.

Em um meio holográfico, os feixes originados por um laser emitindo N modos longitudinais centrados no comprimento de onda $\bar{\lambda} = 2\pi/k$ podem ser escritos como

$$R_N = R_0 \sum_{m=-(N-1)/2}^{m=(N-1)/2} A_m e^{i[(k+m\Delta k)\Gamma_R + \phi_m]} \quad (1)$$

$$S_N = S_0 \sum_{m=-(N-1)/2}^{m=(N-1)/2} A_m e^{i[(k+m\Delta k)\Gamma_S + \phi_m]}$$

onde R_0 e S_0 são amplitudes reais, Δk é a diferença do número de onda entre dois modos adjacentes, ϕ_m é a fase dos m -ésimo modo, Γ_S e Γ_R são respectivamente os caminhos ópticos dos feixes objeto e referência no cristal fotorrefrativo. A intensidade de cada modo é relacionada a cada modo pelo coeficiente A_m . Se todo o processo de gravação ocorre por auto-difração, a intensidade da onda difratada é dada como uma função intensidade da onda de referência I_R por [6]

$$I_D \propto 2m_0^2 \left\{ \frac{\sin[N\Delta k(\Gamma_S - \Gamma_R)/2]}{\sin[\Delta k(\Gamma_S - \Gamma_R)/2]} \right\}^2 I_R \quad (2)$$

onde $m_0 \equiv 2R_0S_0(R_0^2 + S_0^2)^{-1}$ é a visibilidade da franja. A equação (2) foi obtida assumindo que $A_n = 1$. Esta equação mostra claramente que a imagem holográfica do objeto aparece modulada por franjas de contorno. A partir da equação (2) obtém-se uma variação de caminho óptico Γ_R introduzido na onda de referência:

$$\Delta\Gamma_R = \frac{2\pi}{\Delta k} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \equiv \lambda_S, \quad (3)$$

onde $\Delta\lambda$ é a diferença do comprimento de onda de modos do laser consecutivos e λ_S é o comprimento de onda sintético.

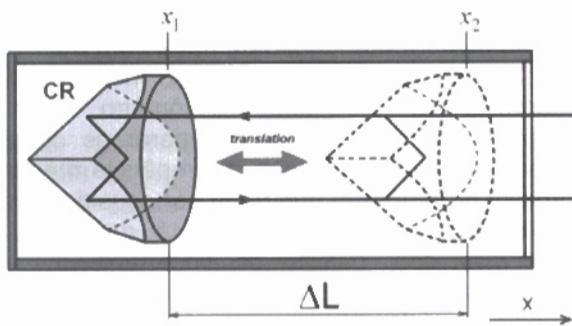


Figura 1: Corner cube CR na célula de teste.

Para a medição do índice de refração, um retro-refletor tipo "corner cube" CR foi empregado na célula de vidro; quando o líquido é introduzido na célula, o CR fica imerso, como mostra a figura 1. O feixe viaja através do fluido e é refletido pelo CR, de modo que seu caminho óptico L através da coluna seja $\Gamma_R = 2nL$, onde n é o índice de refração do líquido. Depois de sair da célula o feixe atinge o cristal BTO, constituindo assim o feixe de referência. Seja uma configuração 1 na qual um ponto A na imagem holográfica do objeto é iluminado por uma franja clara, com o CR em uma posição x_1 (figura 1). Para tal configuração, obtém-se a partir da equação (2) a relação $\Gamma_{SA} - \Gamma_{R1} = 2\pi q / \Delta k$, onde Γ_{SA} é o caminho óptico do feixe objeto através de

EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A configuração óptica com um laser de 40 mW diodo centrado em 669 nm é retratada na figura 2. O cristal BTO foi cortado na configuração eletro-óptica transversa [110] a fim de se aproveitar as características de difração anisotrópica dos cristais da família das selenitas, o que faz os feixes transmitido e difratado ortogonalmente polarizados à saída do cristal [vii]. O polarizador P2 bloqueia a onda transmitida atrás do cristal BTO, possibilitando a detecção de apenas um feixe difratado; com isso melhora-se a relação sinal-ruído da imagem resultante.

A luz refletida pelo divisor de feixe BS propaga-se através do líquido na célula de ensaio. A fim de se evitar perturbações externas a célula foi montada sobre um sistema de translação robusto. Foi utilizada uma célula com dimensões de 80 mm × 20 mm × 20 mm ($x \times y \times z$) e sua parte superior

aberta. A base de alumínio da célula permite uma eficiente refrigeração ou aquecimento por um elemento Peltier. O refletor CR permanece imerso no líquido durante toda a experiência, preso a um suporte acima da célula de ensaio, de modo que não haja contato entre a CR e as paredes da célula. Ao transladar a montagem com o parafuso micrométrico do estágio de translação ao longo do eixo x , variou-se o caminho óptico, como esquematizado na figura 1. A luz emergindo da célula é o feixe de referência após incidir nos espelhos M1, M2 e M3. A imagem do objeto foi formada no cristal BTO pelas lentes L1 e L2 de forma que a imagem holográfica da placa metálica seja projetada no sensor CCD. Essa placa é aproximadamente 45° inclinada em relação à face frontal BTO para A. Γ_{R1} é o caminho óptico do feixe referência na posição x_1 e q é um número inteiro. Na configuração 2, o CR sofre um deslocamento ΔL para uma posição x_2 , de modo que p franjas claras passam por A. Assim, obtemos a variação do caminho óptico $\Gamma_{SA} - \Gamma_{R2} = 2\pi(p + q) / \Delta k$. Como a mudança total no caminho óptico do feixe referência é $\Gamma_{R2} - \Gamma_{R1} = 2n(x_2 - x_1) = 2n\Delta L$, a partir das relações acima e da equação (3) o índice de refração do líquido pode ser escrito como

$$n = \frac{\lambda_s p}{2\Delta L} \quad (4)$$

gerar um contorno de franjas retas e paralelas segundo a equação (2). Uma vez que a área iluminada sobre o objeto é relativamente pequena ($< 2 \text{ cm}^2$), a intensidade total das ondas que irão incidir na face do BTO é alta o suficiente para fornecer hologramas em um tempo relativamente curto, cerca de 5 s.

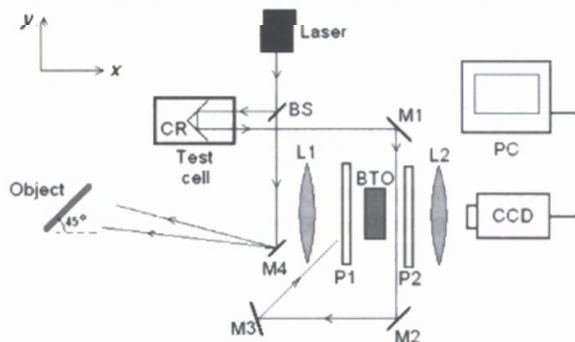


Figura 3

Figura 2: Arranjo óptico para o refratômetro holográfico: BTO, cristal de Bi₁₂TiO₂₀; BS, divisor de feixe; M1 a M4, espelhos; P1 e P2, polarizadores; L1 e L2, lentes; câmera CCD e computador PC para aquisição de imagens.

De acordo com a equação (2), quanto maior o número N de modos de oscilação laser, mais estreita a interferência das franjas claras [6]. Foi também demonstrado que o número de modos é fortemente dependente da corrente aplicada ao laser. Desta forma, a fim de se determinar a ordem p com maior precisão, a corrente do laser foi selecionada para fornecer franjas as mais estreitas possíveis [6,viii]. A Figura 3 mostra a imagem holográfica resultante da placa inclinada para um número estimado de $N = 4$ modos de laser. Como o CR é deslocado, observam-se as franjas deslocadas na imagem holográfica. O comprimento de onda sintético foi determinado trasladando-se o refletor CR por $L_1 = 69.598 \pm 0.005$ mm em uma célula de ensaio vazio para conseguir um deslocamento de $p_1 = 21$ franjas com relação a um ponto de referência, resultando em um comprimento de onda sintético $\lambda_S = 2 L_1 / p_1 = 6.6284 \pm 0.0005$ mm.

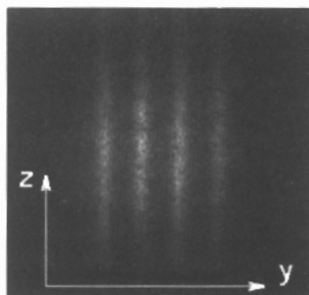


Figura 3: Contour holographic interferogram of the tilted metallic plate for 4 laser modes and $\lambda_S = 6.6284$ mm.

Índice de refração de solução aquosa de água/etanol.

O índice de refração da água foi medido com diferentes concentrações de etanol. A temperatura do líquido foi medida por um termopar e mantida a 20° C, através de um elemento Peltier. Como o percurso máximo do CR na célula de ensaio foi de ~ 70 mm, para cada concentração o procedimento típico era medir o valor de ΔL necessário para um deslocamento de $p = 28$ franjas. A Figura

4 mostra um gráfico do índice de refração desta mistura em função da fração em massa de etanol através do processo holográfico (círculos) e por um refratômetro Abbe comercial (triângulo). Ao comparar as duas medições obtivemos uma discrepância média satisfatória, uma vez que está dentro do intervalo das barras de incerteza. Esta diferença não pode ser atribuída a erros de medição sistemática ou a fenômenos de temperatura, pois para algumas concentrações os resultados obtidos através do método holográfico são maiores, e para outras concentrações, menores.

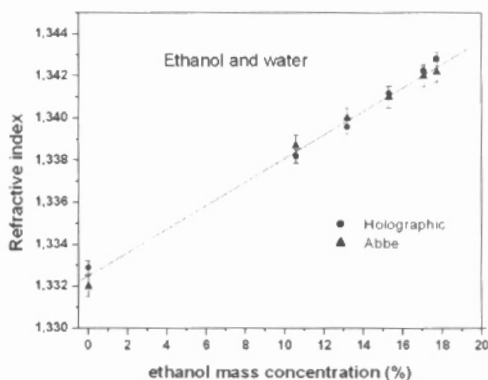


Figura 4: Índice de refração de uma mistura de etanol e água em função da fração em massa de álcool, medidas com refratômetro holográfico (círculos) e por um refratômetro comercial de Abbe (triângulos).

Índice de refração de solução aquosa de NaCl.

Nesta seção, investigou-se o desempenho do refratômetro holográfico em relação a uma das demandas mais importantes de refratometria, ou seja, a determinação de uma concentração de soluto em uma solução, comparando o seu índice de refração com um resultado padrão ou curva. Para este estudo, as concentrações de NaCl foram obtidas para cinco soluções diferentes, medindo-se os índices de refração e usando-se uma equação obtida na referência [ix]. Esta expressão polinomial empírica relaciona o índice de refração da solução com a temperatura T e a concentração de NaCl C_S . De acordo com nossos parâmetros experimentais, definimos a temperatura ambiente $T = 20.5^\circ$ C, de modo que o C_S é

obtido a partir desta fórmula como

$$C_S = (n_S - n_0) / \kappa \quad (5)$$

onde $n_0 = 1.33214 \pm 0.00004$ e $\kappa = 0.1768 \pm 0.0008$ ml/mg e C_S é dada em unidades de mg de soluto por ml de água. A Figura 5 mostra os índices de refração para o refratômetro holográfico (círculos) e refratômetro Abbe (triângulos) em comparação com os seus valores esperados (linha sólida), enquanto os resultados para as concentrações de NaCl obtido a partir da equação (5) para ambos os dispositivos estão listados na tabela 1. As concentrações previamente conhecidas são mostrados na primeira coluna (C_{SNaCl}) e C_{SH} e C_{SA} são as concentrações de NaCl obtido através dos refratômetros holográfico e Abbé, respectivamente. Dos erros percentuais $\delta_{H,A} = 100 \times |C_S - C_{SH,A}| / C_{SNaCl}$ podemos estimar a precisão de ambos os métodos: foi apresentado um valor médio de 7% para o método holográfico e de 10% para o refratômetro de Abbe.

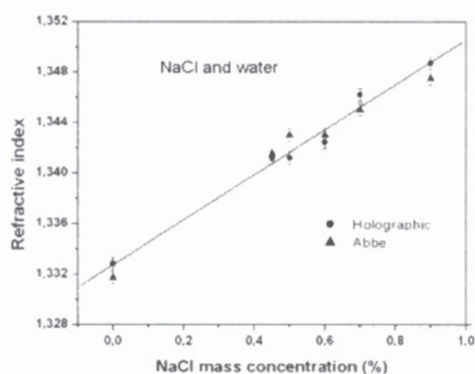


Figura 4: Índice de refração de NaCl em solução aquosa em função da concentração de NaCl, medidas com refratômetro holográfico (círculos) e com refratômetro de Abbe (triângulos). A curva sólida refere-se aos valores estrapolados pela equação (5).

Tabela 1: medidas de soluções aquosas de NaCl por refratometria. C_{SNaCl} são conhecidos como concentração (primeira coluna), a) C_{SH} (terceira coluna) e b) C_{SA} (terceira coluna) são concentrações de NaCl obtidas pelo método holográfico e refratômetro de Abbe, respectivamente.

a) $C_S(10^{-2}$ g/ml)	Holográfico		
	n_{SH}	$C_{SH}(10^2$ g/ml)	$\delta_H(\%)$
4.5	1.3412	5.107	13.5
5.0	1.3412	5.107	2.1
6.0	1.3424	5.813	3.1
7.0	1.3462	7.934	13.3
9.0	1.3486	9.360	4.0

b) $C_S(10^{-2}$ g/ml)	Abbe		
	n_S	$C_{SA}(g/kg)$	$\delta_A(\%)$
4.5	1.3415	5.294	17.6
5.0	1.3430	6.142	22.8
6.0	1.3430	6.142	2.4
7.0	1.3450	7.293	4.2
9.0	1.3475	8.687	3.5

CONCLUSÕES

O princípio de um refratômetro holográfico para análise de líquidos baseado em holografia com múltiplos comprimentos de onda em cristais fotorrefrativos foi descrito e seu desempenho foi analisado. A célula de teste foi inserida no braço do feixe de referência e uma placa metálica foi utilizada como objeto cujas franjas de contorno foram gerados devido à gravação holográfica com múltiplos comprimentos de onda. Como o refletor foi transladado, franjas de interferência retas e paralelas moveram-se sobre o objeto, permitindo assim a determinação do índice de refração. De acordo com a equação (4), a mudança da ordem de uma franja ($\Delta p = 1$) necessita de um deslocamento de $\lambda_s/2$ do refletor. Assim, uma vez que os comprimentos de onda sintéticos gerados nos processos holográficos são muito maiores do que a precisão do fuso micrométrico, a ordem de

franja pode ser exata e precisamente determinada. Além disso, os comprimentos de onda sintéticos relativamente grandes permitem utilizar estágios simples, facilmente disponíveis para o deslocamento, movidos manualmente ou por motores de passo. A imagem do contorno do padrão de franjas em um sensor CCD em vez da detecção do sinal através de uma célula de pequena área contribuiu para uma fácil determinação visual da posição da franja, que permite medições mesmo em condições moderadamente instáveis para gravações holográficas. Os resultados obtidos através do método holográfico mostraram-se muito precisos em comparação com os dados obtidos pelo refratômetro de Abbe.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional Científico e Tecnológico (CNPq), sob concessão 473458/2006-3 e pela Fundação de Apoio à Tecnologia. Danilo Mariano da Silva foi patrocinado por uma bolsa de graduação do CNPq.

REFERENCIAS

- [1] E. Abbe, *Neue Apparate zur Bestimmung des Brechungs- und Zerstreuungsvermögens fester und flüssiger Körper* (Mauke's Verlag, Jena, 1874).
- [2] D. W. Kim, Y. Zhang, K. L. Cooper, A. Wang, *Appl. Opt.* 44, 5368 (2005).
- [3] P. H. Tomlins, P. Woolliams, C. Hart, A. Beaumont, M. Tebaldi, *Opt. Lett.* 33, 2272 (2008).
- [4] M de Angelis, S. De Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, G. Pierattini, *Pure Appl. Opt.* 5, 761 (1996).
- [5] D. H. McQueen, *J. Phys. E* 12, 111 (1979).
- [6] E.A. Barbosa, R. Verzini, J.F. Carvalho, *Opt. Comm.* 263, 189 (2006).
- [7] A. A. Kamshilin, M. P. Petrov, *Opt. Comm.* 53, 23 (1985).
- [8] E.A. Barbosa, *Appl. Phys. B* 80, 345 (2005).
- [9] R.B. Santiago Neto, J.P.R.F. de Mendonça, B. Lesche, *Rev. Fis. Apl. e Inst.* 17, 74 (2004).