



Montagem da técnica de caracterização de índice de refração de materiais semitransparentes baseada no ângulo de Brewster

Construction of the refractive index characterization technique of semi-transparent materials based on the Brewster angle

Stanley Gabriel Sfredo¹, Marcelo Sandrini²

RESUMO

No presente projeto foi montado um experimento de baixo custo, comparado com outras técnicas já fundamentadas, para medição de índice de refração de materiais semitransparentes, baseado no ângulo de Brewster. Foi utilizado um vidro Soda-Lime comercial como material de estudo visando identificar a precisão dos resultados obtidos pela técnica proposta. O resultado obtido ($n \approx 1,5$) apresenta boa concordância com valores reportados na literatura, indicando que a montagem apresenta boa precisão na determinação dessa propriedade óptica. Em uma segunda etapa, foi caracterizado o índice de refração de um monolito híbrido sílica/orgânico, material que tem sido objeto de estudos do grupo de pesquisa de Técnicas Fototérmicas e Espectroscopia Óptica da UTFPR. O resultado obtido ($n \approx 1,45$) concorda muito bem com valores reportados na literatura, os quais foram determinados via espectroscopia elipsométrica. Sendo assim, o estabelecimento da técnica por ângulo de Brewster se mostra promissora para o desenvolvimento de futuros trabalhos do grupo de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: ângulo de Brewster; índice de refração; propriedade óptica.

ABSTRACT

In the present project, compared to other well-established techniques, a low-cost experiment was set up for measuring the refractive index of semi-transparent materials based on the Brewster angle. A commercial Soda-Lime glass was used as the study material to assess the accuracy of the results obtained by the proposed technique. The obtained result ($n \approx 1.5$) shows good agreement with values reported in the literature, indicating that the setup exhibits good precision in determining this optical property. In the second phase, the refractive index of a silica/organic hybrid monolith, a material studied by the Photothermal Techniques and Optical Spectroscopy research group at UTFPR, was characterized. The obtained result ($n \approx 1.45$) agrees very well with values reported in the literature, which were determined via ellipsometric spectroscopy. Thus, establishing the Brewster angle technique appears promising for developing future research projects by the research group.

KEYWORDS: Brewster angle; refractive index; optical property.

Introdução

O controle de propriedades ópticas de materiais semitransparentes é de extrema importância em diversas áreas de pesquisa e aplicação, como por exemplo, comunicação, geração de energia limpa, fotônica, entre outras. Dentre essas propriedades, o índice de refração (n) se destaca, principalmente em aplicações como vidros de cobertura e conversores espectrais para painéis fotovoltaicos, uma vez que materiais com valores de índice de refração inadequados para essas aplicações pode acarretar perda de eficiência dos painéis (BELANÇON *et al.*, 2023).

Sendo assim, para o desenvolvimento de novos materiais para essas aplicações, é de extrema importância que os centros de pesquisa e desenvolvimento tenham acesso a

¹ Bolsista do(a) PIBIC UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: stanley@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7695654313935958.

² Docente do Departamento Acadêmico de Física-DAFIS. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: marcelosandrini@utfpr.edu.br. ID Lattes: 4457380666270620



técnicas de caracterização dessa propriedade. Um equipamento bem estabelecido para determinação do valor de n de materiais semitransparentes é o de espectroscopia elipsométrica (ZOLLNER *et al.*, 2022). Entretanto, trata-se de um equipamento de alto custo e com necessidades de preparação especiais das amostras de estudo.

Nesse contexto, o presente projeto propõe a montagem de uma técnica de caracterização de baixo custo, comparado à elipsometria, para medição do índice de refração em função do comprimento de onda da radiação incidente $[n(\lambda)]$, baseado no princípio de ângulo de Brewster.

Materiais e Métodos

Ângulo de Brewster e índice de refração

O *ângulo de polarização*, também chamado de ângulo de Brewster (θ_B), recebe esse nome devido ao trabalho do físico escocês David Brewster no início do século XIX, no qual ele mostrou que havia um ângulo crítico de incidência em uma superfície para o qual uma luz com determinada polarização não era refletida (BREWSTER, 1815). Brewster determinou empiricamente que esse efeito ocorre quando os feixes refletido e transmitido são ortogonais, isto é,

$$\theta_B + \theta_T = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

Quando o ângulo de incidência é igual ao θ_B , a componente da radiação cuja polarização é paralela ao plano de incidência é completamente transmitida, de modo que a luz refletida tem apenas componente perpendicular (HECHT, Eugene. 2002). Dessa forma, se a radiação incidente for polarizada paralela ao plano a intensidade refletida se anula.

Fazendo uso da lei de Snell temos para refração em dois meios com índice de refração distintos, n_1 e n_2 , temos

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2)$$

onde θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e de transmissão, respectivamente. Se aplicarmos a relação de Brewster para o ângulo de transmissão chegamos à relação,

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\pi/2 - \theta_B) = \cos(\theta_B) \quad (3)$$

$$n_2 = n_1 \tan(\theta_B) \quad (4)$$

Se o meio de incidência for o ar ($n_{ar} \approx 1$) a Eq. (4) permite a obtenção direta do índice de refração (n_2) do material semitransparente sobre o qual a luz é incidida.

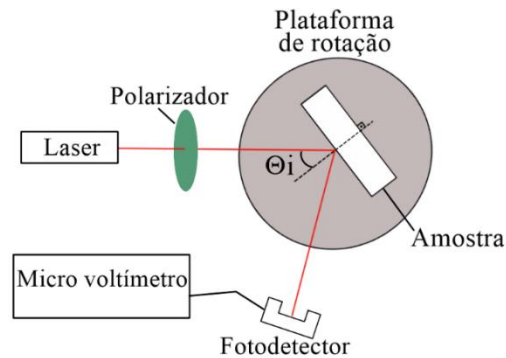
É importante destacar que o índice de refração é uma propriedade óptica intrínseca do material e que depende do comprimento de onda (λ) da radiação incidente. Alguns modelos teóricos permitem a determinação dessa dependência, neste projeto utilizaremos o modelo de Cauchy (PEREIRA; BARRETO; HOROWITZ, 2011), o qual corresponde a relação polinomial e que se adequa a região UV-Vis do espectro:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (5)$$

Onde A, B e C são constantes característica de cada material de estudado.

A configuração experimental montada neste trabalho para determinação do índice de refração, usando a metodologia do ângulo de Brewster, está representada na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração da montagem experimental para determinação do índice de refração via ângulo de Brewster.



Fonte: De autoria própria.

As amostras foram fixadas em uma plataforma de rotação movida por meio de um motor de passo controlado via microcontrolador (Arduino UNO). Um feixe de laser foi incidido sobre a superfície plana e polida da amostra e um polarizador foi utilizado para garantir que o feixe estivesse polarizado perpendicularmente ao plano de incidência. Um fotodiodo e um micro voltímetro foram utilizados para analisar a intensidade do feixe refletido em função da rotação angular.

Por meio da rotação da base, o ângulo de incidência (θ_i) foi variado sistematicamente e, simultaneamente, foi mensurada e registrada a intensidade do feixe refletido. Esse processo permite a construção de um gráfico de intensidade vs ângulo de incidência com perfil parabólico, no qual o θ_B corresponde ao ângulo para o qual a intensidade refletida é mínima. As medições foram realizadas no sentido horário e anti-horário para mitigar possíveis imprecisões de alinhamento. Como apresentado na seção anterior, o índice de refração do material estudado é determinado a partir da tangente do ângulo de Brewster, Eq. (4).

O experimento foi realizado utilizando três lasers de excitação com comprimentos de onda $\lambda=450\text{nm}$, 532nm e $632,8\text{nm}$. A partir dos valores de índice de refração para cada λ e fazendo uso do modelo de Cauchy, Eq. (5), é possível obter o índice de refração do material de estudo como função do comprimento de onda.

Resultados

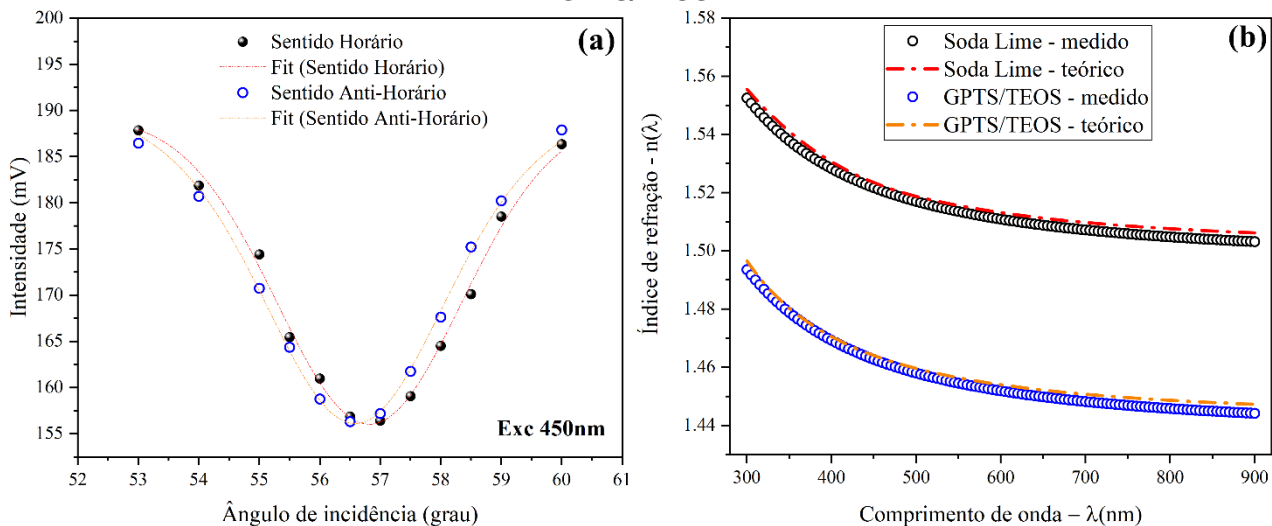
Com o intuito de avaliar a precisão das medidas obtidas utilizando a montagem proposta, foi realizada o estudo de uma amostra padrão de vidro plano Soda-Lime comercial. Esse vidro foi escolhido por ser já ter sido amplamente estudo pela comunidade científica e ter suas propriedades física reportadas na literatura.

A Figura 2 (a) apresenta o perfil de intensidade do feixe refletido pela amostra Soda-Lime em função do ângulo de incidência para o comprimento de onda 450nm . Percebe-se que a intensidade segue perfil polinomial passando por um mínimo, tanto para rotações no



sentido horário quanto no sentido anti-horário. Os resultados obtidos para os demais comprimentos de onda de excitação, não mostrados aqui, apresentaram o mesmo comportamento.

Figura 2 – (a) Padrão de intensidade do feixe refletido em função ângulo de incidência. (b) Valores índice de refração em função do comprimento de onda para o vidro Soda-Lime e para o monolito GPTS/TEOS.



Fonte: De autoria própria.

Para determinação do ângulo no qual a intensidade refletida se minimiza, ângulo de Brewster, foi realizado um ajuste de uma função polinomial de grau 4 utilizando o software Origin Pro 2018. O grau do polinômio foi atribuído ao menor grau que estabelecia um ajuste com $R^2 \geq 0,9$. Esse procedimento foi realizado para os dados obtidos com rotação no sentido horário e no sentido anti-horário.

Conhecido o ângulo de Brewster para cada sentido de rotação, foi calculado o ângulo médio e em seguida, foi calculada a tangente desse ângulo médio, obtendo assim o valor do índice de refração da amostra para o respectivo comprimento de onda da radiação incidente. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para o vidro Soda-Lime.

Tabela 1 – Valores de Ângulo de Brewster (θ_B) e índices de refração obtidos para o vidro Soda-Lime.

λ (nm)	$\theta_B \pm \sigma_\theta$ (grau)	$\theta_B \pm \sigma_\theta$ (grau)	$\theta_{médio} \pm \sigma_\theta$ (grau)	$n \pm \sigma_n$
	Horário	Anti-horário		
450	$56,82 \pm 0,03$	$56,58 \pm 0,02$	$56,70 \pm 0,03$	$1,52 \pm 0,01$
532	$56,65 \pm 0,05$	$56,46 \pm 0,03$	$56,56 \pm 0,04$	$1,51 \pm 0,01$
632.8	$56,54 \pm 0,03$	$56,36 \pm 0,03$	$56,46 \pm 0,03$	$1,50 \pm 0,01$

Fonte: De autoria própria.

As incertezas dos ângulos apresentadas na Tabela 1 são determinadas pelas incertezas do ajuste, cujos valores são fornecidos pelo software. Já as incertezas dos valores de índice de refração são determinadas via teoria de propagação de erros.



Na literatura é reportado um valor de 1,5 par o índice de refração de um vidro soda-lime (MIKHAIL N. POLYANSKIY, 2023; SANDRINI *et al.*, 2023). Esses resultados obtidos indicam que a técnica montada para o presente projeto fornece valores confiáveis para a caracterização dessa propriedade óptica de materiais semitransparente.

Foram mensurados também o índice de refração de um monolito semitransparente híbrido sílica/orgânico a base de precursores Tetraetilortosilicato (TEOS) e 3-Glicidoxipropiltrimetoxissilano (GPTS). Esse material tem sido objeto de estudo do grupo de pesquisa Técnicas Fototérmicas e Espectroscopia Óptica da UTFPR-Pato Branco.

Os resultados de intensidade em função do ângulo de incidência medido para as amostras GPTS/TEOS, para os diferentes comprimentos de onda utilizados, apresentam o mesmo perfil polinomial apresentados para o vidro Soda-Lime na Figura 2 (a), mudando apenas o valor do ângulo para o qual a intensidade foi mínima. Os resultados obtidos para esse material resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de Ângulo de Brewster (θ_B) e índices de refração obtidos para o GPTS/TEOS.

λ (nm)	$\theta_B \pm \sigma_\theta$ (grau)	$\theta_B \pm \sigma_\theta$ (grau)	$\Theta_{média} \pm \sigma_\theta$ (grau)	$n \pm \sigma_n$
	Horário	Anti-horário		
450	55,70 \pm 0,03	55,89 \pm 0,05	55,79 \pm 0,04	1,47 \pm 0,02
532	55,61 \pm 0,05	55,35 \pm 0,02	55,48 \pm 0,04	1,45 \pm 0,01
632.8	55,37 \pm 0,05	55,24 \pm 0,06	55,31 \pm 0,05	1,44 \pm 0,01

Fonte: De autoria própria.

Por fim, utilizando os dados obtidos e o modelo de Cauchy, Eq. 5, determinou-se o índice de refração em função do comprimento de onda, tanto para o monolito GPTS/TEOS quanto para o vidro Soda-Lime. A Figura 2 (b) apresenta os resultados obtidos utilizando a montagem proposta no presente projeto juntamente com valores teóricos reportados na literatura (MIKHAIL N. POLYANSKIY, 2023; SANDRINI *et al.*, 2023).

Verifica-se que os resultados obtidos via ajuste da função de Cauchy, tanto para o Soda-Lime quanto para o monolito GPTS/TEOS, se mostraram ligeiramente menores que os valores teóricos, entretanto essa diferença é irrisória e está atrelada as incertezas intrínsecas da técnica por ângulo de Brewster e da metodologia adotada no presente projeto. Apesar dessa diferença, os valores obtidos apresentam o mesmo perfil de comportamento que os valores teóricos em função do comprimento de onda, indicando que a presente técnica se mostra promissora para estudos de caracterização de novos materiais.

Conclusão

No presente projeto foi montado um experimento para medição de índice de refração de materiais semitransparentes, baseado no ângulo de Brewster. Foi utilizado um vidro Soda-Lime comercial como material de estudo visando identificar a precisão dos resultados obtidos pela técnica montada. O resultado obtido pela montagem apresentada ($n \sim 1,5$) possui boa concordância com valores reportados na literatura. Também foi caracterizado o índice de refração dos materiais híbridos GPTS/TEOS, o resultado medido no presente



projeto concorda muito bem com aqueles obtidos por elipsometria e reportados na literatura.

Os resultados apresentados nesse projeto indicam que o estabelecimento da técnica por ângulo de Brewster se mostra extremamente vantajoso para o desenvolvimento de futuros trabalhos do grupo de pesquisa, por se tratar de uma montagem de custo relativo baixo e que fornece resultados confiáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná -UTFPR e às agências de fomento CNPq, CAPES e Fundação Araucária.

Conflito de interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BELANÇON, Marcos Paulo; SANDRINI, Marcelo; ZANUTO, Vitor Santaella; MUNIZ, Robson Ferrari. Glassy materials for Silicon-based solar panels: Present and future. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 619, p. 122548, nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122548>.

BREWSTER, David. IX. On the laws which regulate the polarisation of light by reflexion from transparent bodies. By David Brewster, LL. D. F. R. S. Edin. and F. S. A. Edin. In a letter addressed to Right Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K. B. P. R. S. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 105, p. 125–159, 1815. <https://doi.org/10.1098/rstl.1815.0010>.

HECHT, Eugene. Optics. London-UK: Addison-Wesley, 2002.

MIKHAIL N. POLYANSKIY. Refractive index database. 2023. **Refractive index database**. Disponível em: <https://refractiveindex.info>. Acesso em: 13 set. 2023.

PEREIRA, Marcelo B.; BARRETO, Bruno J.; HOROWITZ, Flavio. Spectral polarimetry technique as a complementary tool to ellipsometry of dielectric films. **Applied Optics**, v. 50, n. 9, p. C420–C423, 20 mar. 2011. <https://doi.org/10.1364/AO.50.00C420>.

SANDRINI, Marcelo; GEMELLI, Jefferson Cristiano; GIBIN, Mariana Sversut; ZANUTO, Vitor Santaella; MUNIZ, Robson Ferrari; DE VICENTE, Fábio Simões; BELANÇON, Marcos Paulo. Synthesis and properties of Cerium-doped organic/silica xerogels: A potential UV filter for photovoltaic panels. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 600, p. 122033, jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.122033>.

ZOLLNER, Stefan; ABADIZAMAN, Farzin; EMMINGER, Carola; SAMARASINGHA, Nuwanjula. Spectroscopic ellipsometry from 10 to 700 K. **Advanced Optical Technologies**, v. 11, n. 3–4, p. 117–135, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1515/aot-2022-0016>.