

INDICE DE REFRAÇÃO E ESPESSURA DE FILMES
FINOS DE FLUORETOS POR MODOS GUIADOS E
ELIPSOMETRIA

Roberto A. Stempniak e Gabriel F. de O. Freire
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
12.200 - São José dos Campos, SP

Filmes finos de PbF_2 , LaF_3 , CeF_3 e NdF_3 , obtidos por evaporação térmica resistiva foram caracterizados pela técnica de modos guiados e por elipsometria. A comparação das medidas por modos guiados, com os valores já publicados, mostra uma melhor precisão desta técnica sobre as outras correntemente utilizadas. A correlação entre as medidas por modos guiados e elipsometria é boa no caso da espessura mas fraca no caso do índice de refração.

Filmes finos, Óptica Integrada, Elipsometria.

1. INTRODUÇÃO

Entre os materiais empregados para a fabricação de filmes finos para aplicações ópticas os fluoretos apresentam um conjunto de propriedades muito interessantes: não exigem equipamento sofisticado para evaporação, são bastante estáveis, são transparentes em uma boa gama de comprimentos de onda e apresentam índices de refração, para radiação visível, entre 1,33 e 1,75. Assim, sempre oferece interesse as determinações de suas propriedades principalmente quando se considera as boas condições de reprodutibilidade das ca

racterísticas com os modernos equipamentos de vácuo.

Este trabalho está ligado ao estudo de materiais que possam ser utilizados para a fabricação de guias de ondas ópticas a filmes finos. Assim o estudo se restringe a fluoretos que apresentam índice de refração maior que o do substrato, geralmente vidro ($n \approx 1,5$), pois, somente nessas condições é possível obter-se o guiamento óptico [1].

2. FABRICAÇÃO DOS FILMES

Os filmes foram produzidos a partir de material especialmente fornecido para este fim (MARCK e BALZERS), em equipamento "NRC-modelo 3117" ao qual foi acrescentado um sistema de aquecimento do substrato.

Os substratos foram constituídos de lâminas de microcópico de boa qualidade e também de vidros BK7. O índice de refração do substrato foi medido com precisão da ordem de ($\pm 0,0001$) com um refratômetro de Abbe marca "Carl Zeiss", usando como fonte de luz um laser de He-Ne em 633 nm, e fazendo-se a correção da medida com tabelas fornecidas pelo fabricante. A medida cuidadosa desse índice é fundamental para boa precisão do índice dos filmes.

3. MEDIDAS POR MODOS GUIADOS

O método de medida de índice de refração e espessura de um filme fino por modos guiados baseia-se no acoplamento da luz de um laser ao guia de onda formado pelo substrato, filme fino e o ar, com auxílio de um prisma, conforme mostra a Figura 1. Um feixe de laser incide sobre uma das faces de um prisma de índice de refração n_3 o qual se apoia

sobre o sistema filme-substrato com índices, respectivamente iguais, a n_1 e n_0 . Sendo θ_3 o ângulo de reflexão na face do prisma adjacente ao filme, o acoplamento pode ocorrer por tunelamento óptico se essa reflexão for total e se houver coincidência entre a componente do vetor de onda da radiação no prisma paralela ao filme e a constante de propagação, de um dos modos guiados dentro do filme. Assim, sendo conhecido o ângulo de incidência do laser na face de entrada do

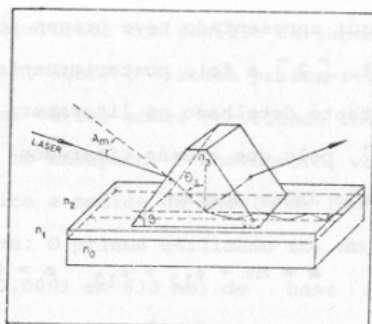


Figura 1 - Acoplamento da radiação laser a um guia a filme fino com auxílio de um prisma.

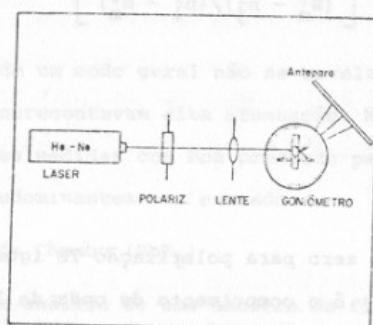


Figura 2 - Esquema do equipamento para observação dos modos guiados.

prisma, bem como o ângulo entre a face de entrada e a face

adjacente ao filme, pode-se obter o valor da constante de propagação, β_m , do modo que foi excitado. Essa constante, por sua vez, é função de vários parâmetros facilmente conhecidos e, também, do índice de refração n_1 e da espessura W , do filme. Se o filme comportar um número igual ou maior que dois modos distintos, pode-se, a partir da medida do ângulo do feixe de laser incidente para cada um dos modos, obter um sistema de equações que permite calcular n_1 e W .

O método aqui apresentado teve origem nos trabalhos de P.K. Tien et al. [2] e foi, posteriormente expandido, e se encontra bastante detalhado na literatura [3], [4], [5], [6], [7], [8], pelo que apenas citaremos as equações principais que são dadas abaixo:

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(n_1^2 - N_m^2\right)^{1/2} W = m\pi + \phi_{12} + \phi_{10} \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

onde

$$\phi_{1j} = (n_1/n_j)^{2h} \left[(N_m^2 - n_j^2)/(n_1^2 - N_m^2) \right]^{1/2} \quad (2)$$

e

$$N_m = (\lambda/2\pi) \beta_m \quad (3)$$

sendo h igual a zero para polarização TE igual a 1 para polarização TM e λ é o comprimento de onda da luz utilizada.

Assim para n modos temos um sistema de n equações do tipo (1). Se $n = 2$ o sistema apresenta uma única solução em n_1 e W . Esse sistema deve ser, em virtude do caráter trans

cidental das funções envolvidas, resolvido numericamente. Se $n > 2$ o problema é sobredeterminado e métodos de otimização por mínimos quadrados são aplicáveis [6].

4. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental para as medidas encontra-se esquematizado na Figura 2, onde o laser é de hélio-neônio, com comprimento de onda de 633 nm, potência de aproximadamente 6 mW e polarização fixa. O feixe de laser é analisado pelo polarizador e focalizado com auxílio da lente, de distância focal de + 0,50 m, sobre o sistema prisma-filme-substrato e o acoplamento dos vários modos verificado com auxílio das linhas "m" [1] no anteparo. O goniômetro, com precisão de 1' de arco permite a medida do ângulo de incidência do feixe sobre o prisma. O prisma utilizado foi de vidro SF 11 ($n_3 = 1,7789 \pm 0,0001$ em 633 nm) de base aproximadamente triângulo isósceles com um ângulo reto e de arestas aproximadamente de 1 cm.

5. RESULTADOS

Os filmes de um modo geral não se revelaram bons guias de onda já que apresentavam alta atenuação. Mesmo assim foi possível fazer as medidas com boa precisão pela análise do modo que era predominantemente exatado.

5.1 - Fluoreto de Chumbo (PbF_2)

Foi feita a análise de uma amostra de filmes com espessura da ordem de 300 nm o que permitia dois modos de ordem zero ($m = 0$) de polarização TE e TM. As condições de evaporação foram variadas com a temperatura do substrato entre

20°C e 300°C e taxa de evaporação também variável, constatando-se que o efeito dessas variações não foi notado senão a partir da terceira casa depois da vírgula. As constatações das dependências desses parâmetros não foram, ainda, em virtude do tamanho da amostra e das técnicas empregadas, decisivas para uma análise completa.

O valor do índice de refração obtido foi de $(1,764 \pm 0,001)$ onde o desvio corresponde ao desvio padrão de amostra e não ao desvio experimental que foi muito menor. Esse valor se compara muito bem com o citado por outros autores, utilizando outros métodos: E. Ritter [9], 1,75 ($\lambda = 550$ nm), H. Pulker [10], 1,75 ($\lambda = 550$ nm). J. M. Bennet [11], 1,764 ($\lambda = 633$ nm).

5.2 - Fluoreto de Lantânio (LaF_3)

A amostra foi de apenas três filmes com espessuras de 590, 1200 e 1530 nm, respectivamente. O primeiro admitia um modo TE e um modo TM de ordem zero e, os dois últimos, dois modos TE de ordem 0 e 1 e dois TM. Foram usados apenas os modos TE.

O valor do índice médio foi de 1,569 que se compara com 1,58 citado por G. Hass [12] ($\lambda = 600$ nm), 1,6 ($\lambda = 550$ nm) por E. Ritter [9] e 1,55 a 1,65 de H. K. Pulker [10] ($\lambda = 550$ nm).

5.3 - Fluoreto de Cério (CeF_3)

Neste caso a amostra era de cinco filmes, três deles com espessuras da ordem de 500 nm com um modo TE e um modo TM e dois com espessura da ordem de 1100 nm com dois modos TE e dois TM. Foram usados apenas os modos TE.

O índice de refração médio foi de 1,588, comparável com 1,61 ($\lambda = 600$ nm) de G. Hass [12], 1,6 ($\lambda = 550$ nm) de E. Ritter [9], e 1,63 ($\lambda = 550$ nm) de H. K. Pulker [10].

5.4 - Fluoreto de Neodímio (NaF_3)

Deste filme dispunhamos apenas de uma amostra com espessura de 360 nm, comportando um modo TE e um modo TM. O valor do índice foi de 1,583 e os citados foram 1,60 ($\lambda = 600$ nm) por G. Hass [12], 1,6 ($\lambda = 550$ nm) por E. Ritter [9], 1,61 ($\lambda = 550$ nm) por H.K. Pulker [10].

6. CORRELAÇÃO COM ELIPSOMETRIA

Os filmes estudados foram medidos também por elipsometria usando um elipsômetro Gaertner L117 com fonte de luz constituída por um laser de He-Ne em 633 nm, fabricado com a finalidade de ser usado em linhas de produção de dispositivos semicondutores, a fim de se estabelecer uma comparação dos resultados com outro método. Os métodos elipsométricos já se encontram da mesma forma que o de modos guiados bem descritos na literatura, por exemplo F.L. McCrackin et al. [13]. Os resultados da correlação estão representados na Figura 3 para o índice de refração e na Figura 4 para espessura. A análise dos resultados mostra uma correlação muito boa para a espessura, porém fraca para o índice de refração.

Uma análise dos erros experimentais de ambos os métodos mostra que o método de modos guiados apresenta uma precisão muito maior que a elipsometria, com o tipo de elipsômetro usado, para o índice de refração. Por outro lado esse tipo de elipsômetro se mostra bastante adequado para medi

das de espessura.

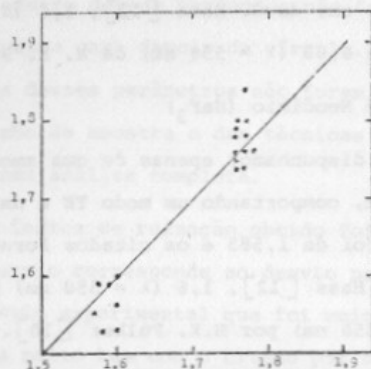


Figura 3 - Correlação entre as medidas de n_1 por modos guia dos (abscissa) e por elipsometria (ordenada).

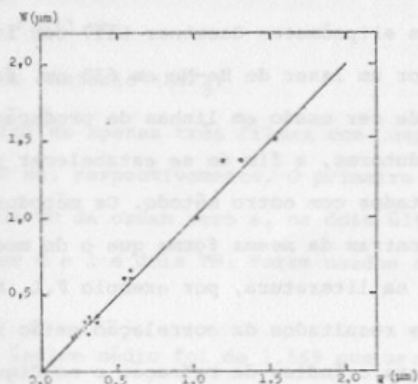


Figura 4 - Correlação entre as medidas de W por modos guia dos (abscissa) e por elipsometria (ordenada).

7. CONCLUSÃO

O método dos modos guiados parece se firmar como uma das técnicas mais acuradas e simples de medida de índice de refração e espessuras de filmes finos. Neste trabalho verificamos que, mesmo em filmes que não se comportam como bons

guias o método é aplicável com segurança.

8. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IEAV do CTA e, especialmente a D. Rosemary do Prado de Mory pela colaboração na elaboração da maioria dos filmes citados.

9. REFERÊNCIAS

- [1] TIEN, P.K. Appl. Opt. 10, 11, 2395 (1971).
- [2] TIEN, P.K. et all. Appl. Phys. Lett., 14, 291, (1969).
- [3] TIEN, P.K. Rev. Mod. Phys., 49, 2, 361, (1977).
- [4] ZERNIKE, F. Integrated Optics, Ed. T. Tamir, pg. 201, Springer-Verlag, Amsterdam (1975).
- [5] ULRICH, R. J. Opt. Soc. Am., 60, 10, 1337 (1970).
- [6] KERSTEN, R.Th. Opt. Comm., 9, 4, 427 (1973).
- [7] ULRICH, R. & TORGE, R. Appl. Opt., 12, 12, 2901 (1973).
- [8] STERNIAK, R.A. & FREIRE, G.F. de O. III Simpósio Brasileiro de Microeletrônica, S. Paulo, julho de 1983.
- [9] RITTER, E. Zeit. Ang. Mat. Physik, XII, 275 (1961).
- [10] PULKER, H. Appl. Opt., 18, 12, 969 (1979).
- [11] BENNET, J.M. Appl. Opt., 4, 8, 961 (1965).
- [12] HASS, G. et all. J. Opt. Soc. of Am., 49, 2, 116 (1969).
- [13] MCCRACKIN, F.L. et all. J. Res. NBS-A Phys. Chem., 67A, 4, 363 (1963).

Trabalho parcialmente financiado pelo Projeto FINEP/ITA/CTA/MAer 32/82/0533/00.