

ANÁLISE DA NÃO UNIFORMIDADE DE FILMES FINOS
COM AUXÍLIO DE MODOS GUIADOS

Roberto A. Stempniak
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Departamento de Física
CTA
12.200 - São José dos Campos, SP

Propõe-se como técnica de medida de não uniformidade de filmes finos a medida de es pes su ra em diferentes pontos a partir das cons tantes de propagação de modos guiados. O mé do se aplica a filmes transparentes com es pes su ra suficiente para se comportar como gui a de ondas. Apresenta-se ainda, uma análise da sensibilidade do método e de sua res olu ção espacial.

1. Introdução

A medida de espessuras e de índice de refração de fil mes finos através do acoplamento de modos guiados por pris ma é uma técnica bem conhecida $|_1| |_2| |_3|$. Analisa-se neste trabalho a possibilidade de se usar esta técnica para a veri fica ção de pequenas variações de espessuras em diferentes pon tos do filme.

2. Guias Planares e Acoplamento por Prisma

Um guia de ondas dielétrico com geometria planar admite um número inteiro de modos para cada tipo de polarização: TE ou TM. No caso de polarização TE a equação que relaciona as propriedades do guia com os modos guiados é:

$$(2\pi/\lambda)W(n_f^2 - N_m^2)^{1/2} = m\pi + \arctg\left(\frac{N_m^2 - n_C^2}{n_f^2 - N_m^2}\right)^{1/2} + \arctg\left(\frac{N_m^2 - n_S^2}{n_f^2 - N_m^2}\right)^{1/2}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

onde W é a espessura do filme, λ o comprimento de onda da luz, n_f , n_C e n_S , respectivamente, os índices de refração do filme, da cobertura e do substrato e, ainda, N_m , o índice de refração efetivo do modo de ordem m , isto é, a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade de fase do modo guiado.

O acoplamento da radiação laser ao guia, a partir de uma fonte externa pode ser feito por tunelamento óptico com auxílio de um prisma colocado sobre o filme, como indica a figura 1. Esse arranjo experimental pode fornecer também os índices de refração efetivos, através da medida dos ângulos que permitem o acoplamento seletivo de cada um dos modos. A expressão que relaciona os ângulos A_m com o índice efetivo é

$$N_m = n_p \sin \left[B + \arcsen \left(\frac{\sin A_m}{n_p} \right) \right] \quad (2)$$

onde n_p é o índice de refração do prisma ($n_p > n_f$) e B é o ângulo entre a face de entrada do prisma e a face adjacente ao filme.

As equações (1) e (2) permitem estabelecer uma relação entre a espessura do filme e os correspondentes ângulos de acoplamento para cada um dos modos. A figura 2 mostra essa relação para o caso particular em que os índices de refração do filme, do substrato, da cobertura e do prisma são, respectivamente, 1,75, 1,51, 1,00 e 1,779, e o ângulo B igual a 45° apenas para os modos de polarização TE. Para a polarização TM o conjunto de curvas é semelhante, apenas levemente deslocado para cima.

As medidas dos ângulos de acoplamento para, pelo menos dois modos diferentes permite a partir das equações (1) e (2)

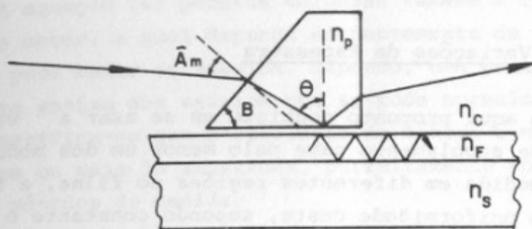


Figura 1 - Acoplamento laser-guia de onda, por tunelamento óptico, com auxílio de um prisma.

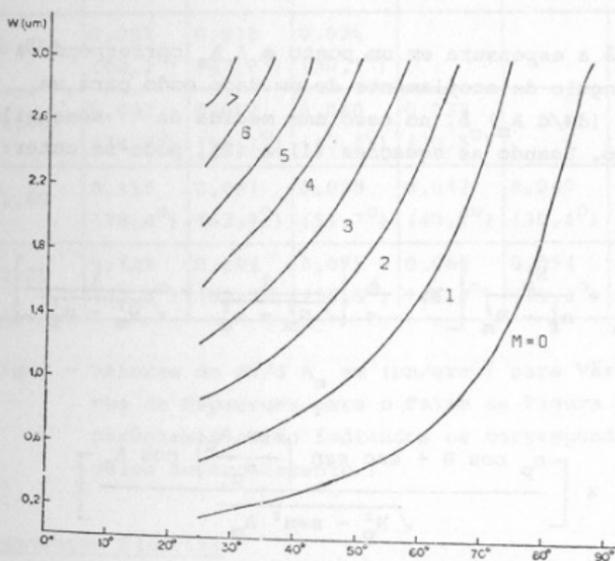


Figura 2 - Relação entre espessura e ângulos de acoplamento para um filme de PbF_2 sobre vidro.

a determinação de n_f e W $|_1$ $|_2$ $|_3$ $|_4$.

3. Medida de Variações de Espessura

O método aqui proposto consiste em se usar a variação dos ângulos de acoplamento para pelo menos um dos modos quando se faz a medida em diferentes regiões do filme, a fim de se analisar a uniformidade deste, supondo constante o índice de refração do filme. Para isto importa conhecer, em cada caso, qual a sensibilidade do método em termos de variação de espessura para uma dada variação angular. Podemos escrever, em primeira aproximação,

$$W = W_0 + \left(\frac{dW}{d A_m} \right)_0 \Delta A_m \quad (3)$$

onde W_0 é a espessura em um ponto e ΔA_m corresponde a variação do ângulo de acoplamento de um dado modo para um ponto vizinho. $(dW/d A_m)$ é, no caso uma medida da sensibilidade do método. Usando as equações (1) e (2), pode-se obter:

$$\frac{dW}{d A_m} = \frac{N_m}{n_f^2 - N_m^2} \left[W + \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{N_m^2 - n_c^2}} + \frac{1}{\sqrt{N_m^2 - n_l^2}} \right) \right] \times$$

$$\times \left[\frac{n_p \cos B + \arcsen \left(\frac{\sin A_m}{n_p} \right) \cos A_m}{\sqrt{N_p^2 - \sin^2 A_m}} \right] \quad (4)$$

A tabela I mostra os valores de $(dW/d A_m)$ em micrômetros por grau para o caso do mesmo filme cujas curvas são mostradas na figura 2.

A equação (4) permite calcular também a resolução que se pode obter, a qual depende evidentemente da precisão com que se pode medir os ângulos. Supondo, uma precisão de $0,1^\circ$ bastante abaixo dos valores que se pode normalmente conseguir, verifica-se que a resolução do método é melhor de $0,005 \mu\text{m}$ ou seja 50 angstroms, perfeitamente comparável com outros métodos de medida.

Espessura (μm)	m = 0	m = 1	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5
0,20	0,010 (31,7 $^\circ$)					
0,60	0,027 (57,4 $^\circ$)	0,018 (31,0 $^\circ$)				
1,00	0,052 (68,2 $^\circ$)	0,032 (47,9 $^\circ$)	0,026 (30,7 $^\circ$)			
1,40	0,082 (74,3 $^\circ$)	0,052 (57,1 $^\circ$)	0,040 (43,4 $^\circ$)	0,033 (30,5 $^\circ$)		
1,80	0,115 (78,4 $^\circ$)	0,077 (63,9 $^\circ$)	0,058 (51,7 $^\circ$)	0,047 (40,7 $^\circ$)	0,040 (30,4 $^\circ$)	
2,20	0,129 (81,5 $^\circ$)	0,104 (68,3 $^\circ$)	0,079 (57,6 $^\circ$)	0,065 (48,0 $^\circ$)	0,054 (39,0 $^\circ$)	0,049 (30,4 $^\circ$)

Tabela I - Valores de dW/dA_m em ($\mu\text{m}/\text{grau}$) para Vários Valores de Espessura para o Filme da Figura 2. (Entre parêntesis estão indicados os correspondentes Ângulos de Acoplamento.)

4. Resolução Espacial

Outro aspecto relevante do método é aquele relacionado com a resolução espacial, isto é, a mínima área do filme que se analisa de cada vez. Uma estimativa deste parâmetro pode ser feita supondo que o acoplamento ocorre numa área igual a projeção do feixe de laser, suposto cilíndrico, sobre a face

do prisma mais próxima do filme, que no caso é uma elipse. Para um feixe de diâmetro d , esta área é:

$$A = \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{\sqrt{1 - (N_m^2/n_p^2)}}$$

Nos casos usuais essa área tem um valor menor que 2mm^2 . Usando-se uma lente para focalizar o feixe, o que melhora as condições de acoplamento a custa de algumas dificuldades experimentais, a área analisada é, ainda menor. Neste caso pode-se usar ainda a expressão (5) desde que d seja considerada como a cintura do feixe focalizado.

5. Aplicabilidade do Método

A aplicabilidade do método de modos guiados nem sempre, porém, é possível. Somente filmes transparentes, de espessura suficiente para suportar pelo menos um modo é que são possíveis de serem medidas por esta técnica. Além disso é desejável que a atenuação dos feixes guiados não seja muito grande. Temos, entretanto, notado que mesmo filmes com atenuação razoável, podem ser medidos pelo método anteriormente citado pois não se exige que a radiação seja guiada por grandes distâncias ao longo do filme mas apenas que o feixe seja acoplado como um dos modos de propagação do guia.

Na Figura 3 mostra-se o resultado de medidas feitas em um filme de fluoreto de chumbo depositados sobre vidro por evaporação térmica. O filme foi obtido colocando-se a fonte bem próxima do substrato (15 cm), sem a rotação deste. No caso foi usada a variação angular do modo TE_0 . A espessura em $x = 0,50$ cm era de 0,426 e o índice de refração obtido de 1,71. O guia comportava dois modos TE.

6. Conclusão

A aplicação do método é viável em muitos casos, fornecendo uma sensibilidade e resolução comparável a de outros métodos.

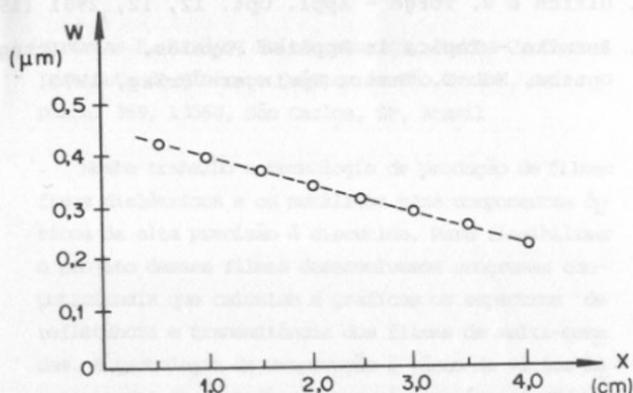


Figura 3 - Medidas de Variação de Não Uniformidade em um Filme de PbF_2 depositado sobre vidro

dos mais sofisticados. A vantagem principal reside na simplicidade do equipamento exigido. As dificuldades numéricas e eventuais são relativamente pequenas e uma pequena calculadora programável é perfeitamente satisfatória para a maioria dos cálculos necessários.

7. Agradecimentos

O filme citado no presente trabalho e outros usados para o teste do método foram produzidos nos laboratórios do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Centro Técnico Aeroespacial pela Sra. Rosemary do Prado Demori a quem agradecemos, bem como a FINEP que financiou parcialmente estes estudos (Proj. 32/82/053/00).

8. Referências

- [1] P.K. Tien, R. Ulrich e R.J. Martin - Appl. Phys. Lett., 14, 291 (1969).

- [2] P.K. Tien e R. Ulrich - J. Opt. Soc. Am., 60, 10, 1325 (1970).
- [3] R. Ulrich e R. Torge - Appl. Opt. 12, 12, 2901 (1973).
- [4] F. Zernike - Topics in Applied Physics, Integrated Optics, Ed. T. Tamir, Springer-Verlag, 1975.