PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES FINOS

FILMES MONOCAMADA

Luz atravessa a interface de separação dos dois meios conforme mostra a Fig. 6.4.

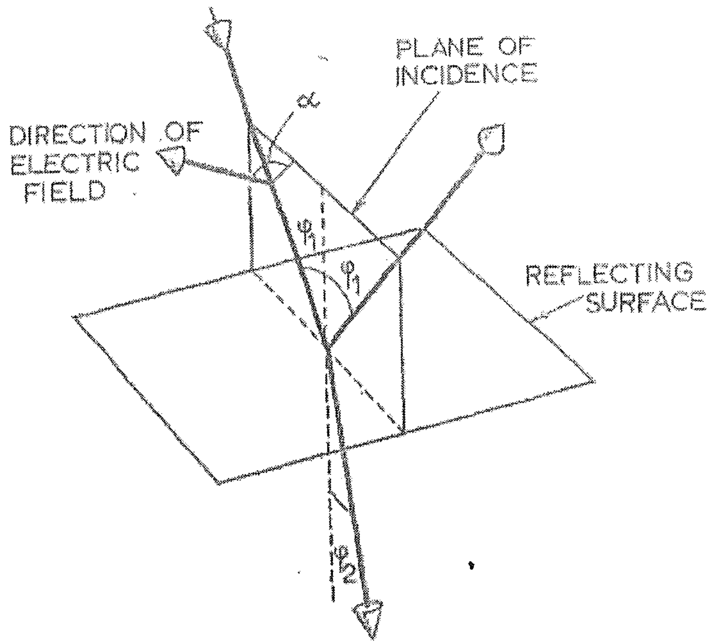


Fig. 6.4.

<u>Para incidência normal</u>

Coeficiente de reflexão

$$r = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$$

Coeficiente de transmissão

$$t = 2\ n_1/(n_1 + n_2)$$

Refletância da superfíce

$$R = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2$$

Transmintância através da superficie

$$T = (n_2/n_1)t^2 = 4n_1n_2/(n_1 + n_2)^2$$

Na interface ar-vidro (n_0 = 1, n_1 = 1,5), R = 0,04, i. e. 4% da luz incidente é refletida.

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES FINOS

FILMES MONOCAMADA

Para um filme fino de espessura D_1 sobre vidro, e incidência não-normal (Fig. 6.6), temos que considerar *interferência da luz.* Teremos

(Fig 6.6 p 95 L-C)

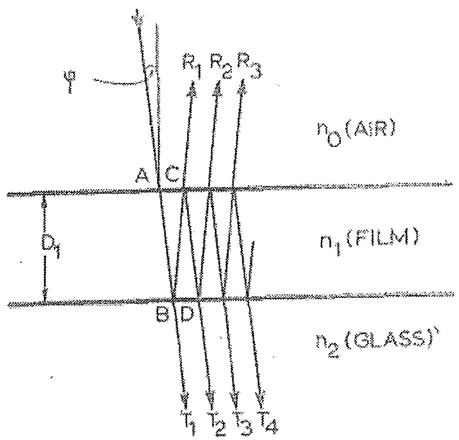


Fig. 6.6.

Teremos, neste caso, para R e T,

(Eqs 6.3a e 6.3b L-C)

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \dfrac{2\pi(AB+BC)}{\lambda_1}}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \dfrac{2\pi(AB+BC)}{\lambda_1}},$$

$$T = \frac{t_1^2t_2^2}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \dfrac{2\pi(AB+BC)}{\lambda_1}},$$

r_1, r_2, t_1 e t_2 = coeficientes de reflexão e de transmissão nas interfaces superior e inferior.

λ_1 = comprimento de nda da luz no filme.

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES FINOS
FILMES MONOCAMADA

Para incidência normal, n_0 =1 (ar), R e T ficam

$$R = \frac{(n_2^2 + n_1^2)(1 + n_1^2) - 4n_2n_1^2 + (n_2^2 - n_1^2)(n_1^2 - 1)\cos\frac{4\pi D_1}{\lambda_1}}{(n_2^2 + n_1^2)(1 + n_1^2) + 4n_2n_1^2 + (n_2^2 - n_1^2)(n_1^2 - 1)\cos\frac{4\pi D_1}{\lambda_1}} \quad (6.4\,a)$$

$$T = \frac{8n_2n_1^2}{(n_2^2 + n_1^2)(1 + n_1^2) + 4n_2n_1^2 + (n_2^2 - n_1^2)(n_1^2 - 1)\cos\frac{4\pi D_1}{\lambda_1}} \quad (6.4\,b)$$

O gráfico da Fig. 6.7 é uma aplicação da equação acima para um filme depositado em vidro (n_2 = 1,5). Diversos valores do índice de refração do filme estão lançados como parâmetro.

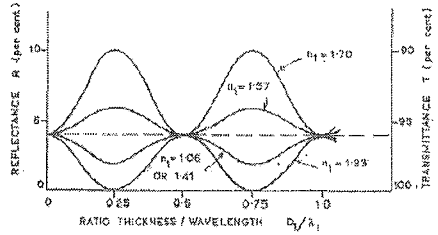


Fig. 6.7. Reflectance of a thin film coating on glass.

Sobre o gráfico acima:

A. Se $D_1 = N\lambda/2$ com N = 1, 2,3,...R e T são as mesmas que que aquelas do substrato (vidro,n = 1,5, refletância de 4%).
B. Para $D_1 = N\lambda_1/4$ com N = 1,3,5,... as mudanças de R e T são signifcativas.
C. Para n_1 = 1,23, na condição B acima, a refletância é zero o que implica numa transmitância de 100%. (R + T = 1 para um filme não absorvedor).

Questões interessantes relacionadas à Eq. 6.4a.

1. Para refletância zero num filme de quarto de onda, qual a relação entre n_1 e n_2? (Considerando sempre n_0 = 1).
2. Para um determinado par de valores (n_1, n_2) e n_0 = 1, qual a expressão que relaciona D_1 com o comprimento de onda λ_0 em vácuo para um filme de quarto de onda tal que R= 0.
3. Se quisermos R = 0 para o comprimento de onda no vácuo de 500 nm (aproximadamente o centro do espectro visível), qual a espessura do filme para n_1 = 1,23 e n_2 = 1,5?

$$R = \frac{(n_2^2+n_1^2)(1+n_1^2) - 4n_2n_1^2 + (n_2^2-n_1^2)(n_1^2-1)\cos\dfrac{4\pi D_1}{\lambda_1}}{(n_2^2+n_1^2)(1+n_1^2) + 4n_2n_1^2 + (n_2^2-n_1^2)(n_1^2-1)\cos\dfrac{4\pi D_1}{\lambda_1}} \quad (6.4\,a)$$

$$T = \frac{8n_2n_1^2}{(n_2^2+n_1^2)(1+n_1^2) + 4n_2n_1^2 + (n_2^2-n_1^2)(n_1^2-1)\cos\dfrac{4\pi D_1}{\lambda_1}} \quad (6.4\,b)$$

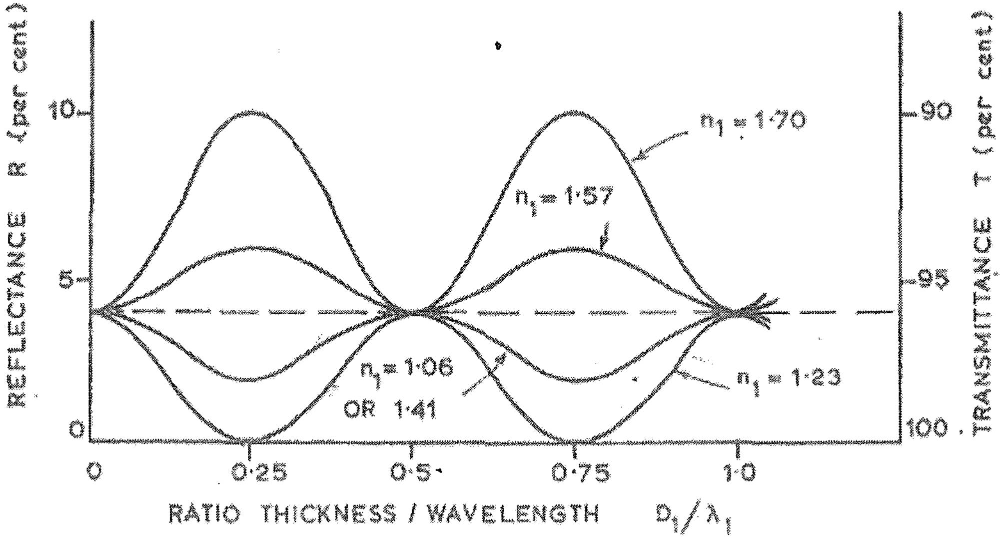


Fig. 6.7. Reflectance of a thin film coating on glass.

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES FINOS

FILMES MULTICAMADA

Possivelmente, a mais importante aplicação de filmes finos em instrumentos ópticos e' em camadas anti-refletoras. A mais baixa refletância de uma monocamada que se consegue em vidro crown é de 1,3%. Além disso, tal refletância é limitada a comprimentos de onda muito estreitos.

Com filmes de duas camadas essas dificuldades podem ser melhoradas e mais ainda com filmes de diversas camadas.

Um filme de duas camadas é representado na Fig. 6.8.

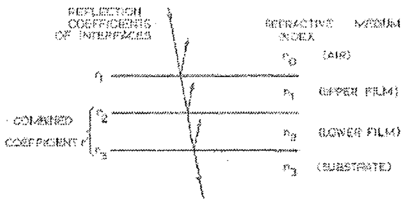


Fig. 6.8. A two-layer coating and its reflection coefficients.

A expressão para R desse sistema é complexa, mas como o interesse é para R = 0, apenas o par de equações abaixo é colocado.

$$\left.\begin{aligned} \tan^2\delta_1 &= \frac{n_1^2(n_3-n_0)(n_2^2-n_0n_3)}{(n_1^2n_3-n_2^2n_0)(n_0n_3-n_1^2)}, \\ \tan^2\delta_2 &= \frac{n_2^2(n_3-n_0)(n_0n_3-n_1^2)}{(n_1^2n_3-n_2^2n_0)(n_2^2-n_0n_3)}, \end{aligned}\right\}$$

Nessas equações, $\delta_1 = 2\pi n_1D_1/\lambda$ e $\delta_2 = 2\pi n_2D_2/\lambda$.

Se $\delta_1 = \pi/2$ e $\delta_2 = \pi$, as espessuras da primeira e segunda camada serão de um quarto e meio comprimentos de onda no vácuo. Empregando-se $n_0 = 1$ (ar), $n_1 = 1{,}38$ (MgF_2), $n_2 = 1{,}85$ (SiO) e $n_3 = 1{,}51$ (vidro crown) e $\delta_1 = \pi/2$ e $\delta_2 = \pi$, a curva resultante está representada na Fig. 6.10, juntamente com as curvas para uma e três camadas. A refletância para o filme bicamada é efetivamente zero em duas faixas de comprimentos de onda relativamente estreitos. Mas o de três camadas apresenta R =0 numa faixa bem mais larga.

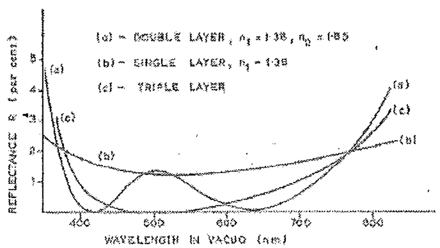


Fig. 6.10. Theoretical plots of reflectance R against wave-length.

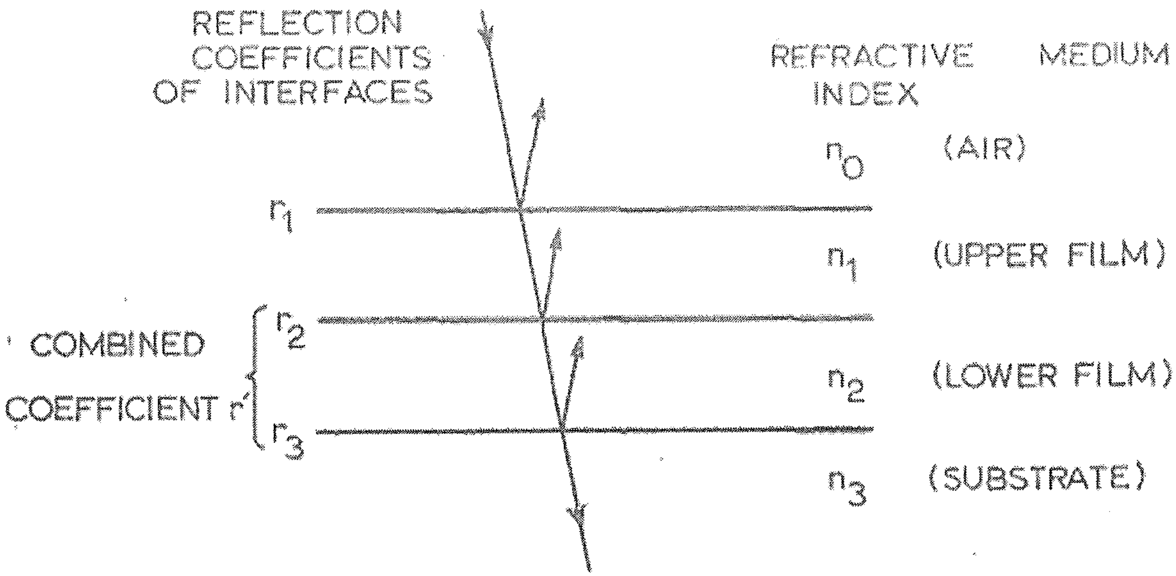


Fig. 6.8. A two-layer coating and its reflection coefficients.

$$\left.\begin{aligned}\tan^2\delta_1 &= \frac{n_1^{\,2}(n_3-n_0)(n_2^{\,2}-n_0n_3)}{(n_1^{\,2}n_3-n_2^{\,2}n_0)(n_0n_3-n_1^{\,2})},\\ \tan^2\delta_2 &= \frac{n_2^{\,2}(n_3-n_0)(n_0n_3-n_1^{\,2})}{(n_1^{\,2}n_3-n_2^{\,2}n_0)(n_2^{\,2}-n_0n_3)},\end{aligned}\right\}$$

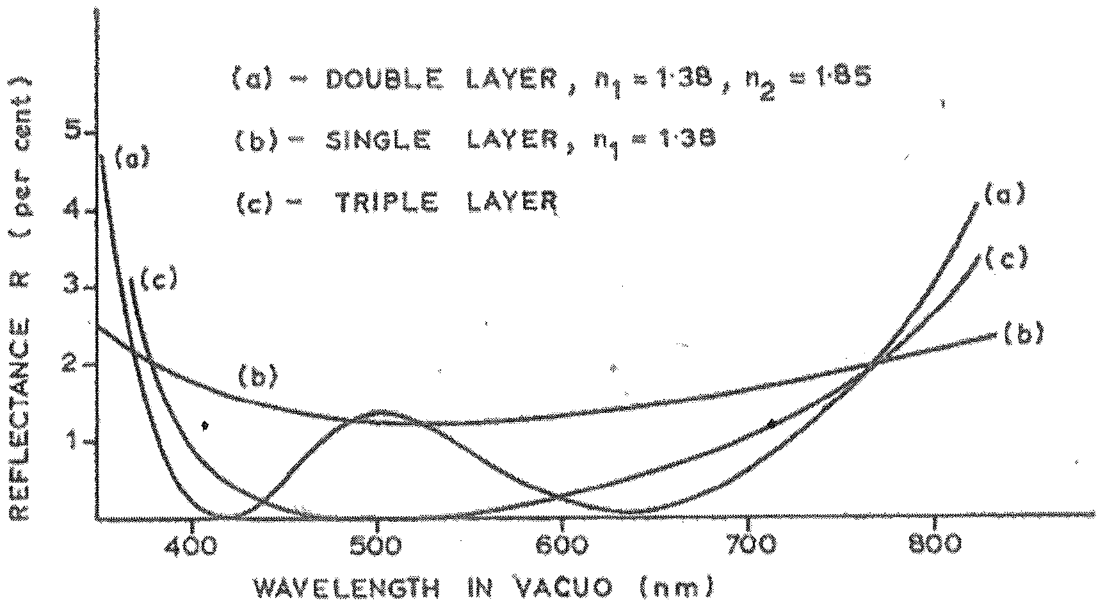


Fig. 6.10. Theoretical plots of reflectance R against wave-length.

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES FINOS

DETERMINAÇÃO DE ESPESSURA – MÉTODO DE TOLANSKY

Com o sistema óptico da Fig. 4, a espessura de um filme pode ser medida. O sistema baseia-se na geração de um interferograma de *franjas de Fizeau*.

Franjas de Fizeau são geradas por luz monocromática quando se coloca em contato duas placas de vidro opticamente planas formando uma cunha de pequeníssimo ângulo. A distância t entre as duas placas varia e o espaçamento entre franjas corresponde a uma diferença de $\lambda/2$ onde λ é o comprimento de onda da luz.

No sistema da figura, uma das placas é de vidro semi-transparente e na outra é coberta com o filme a medir. Uma máscara é usada na deposição de modo a produzir um degrau, ou um canal cuja altura é a espessura do filme.

Com um ajuste cuidadoso do ângulo entre as placas, o interferograma AÁB'B é observado no microcópio. Um cursor (não mostrado) integrado ao sistema mede as distâncias no interferograma possibilitando a determinação da espessura do filme, D, pela relação $D = (x/d)\ \lambda/2$ onde x e d são especificados no desenho ao lado da Fig. 4.

(Fig 4 e franjas)

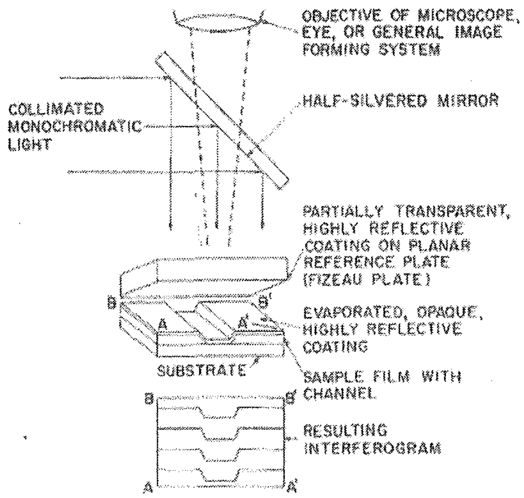
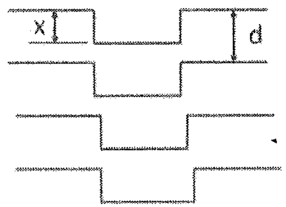


Fig. 4 Schematic view of apparatus for producing multiple-beam Fizeau fringes (Tolansky technique).



Franjas de Fizeau para o filme com degrau

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES FINOS
DETERMINAÇÃO DE ESPESSURA – MÉTODO DE TOLANSKY

A figura da esquerda é um esquema de um sistema de sputtering em que é medida a espessura de um filme de SiO_2 durante seu crescimento

$$d = \frac{N\lambda}{2n_f \cos \theta_f} + \Delta t_\varphi + \Delta t_r$$

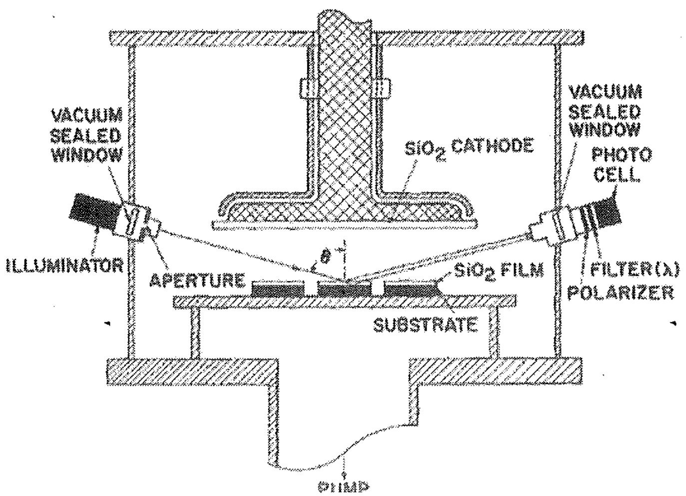
where $N = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \ldots$ for interference minima, or $N = 0, 1, 2, 3,$ for maxima (see Fig. 57)

n_f = refractive index of film material (1.470 for sputtered SiO_2)

θ_f = angle of refraction in the film

Δt_φ = phase-shift correction

Δt_r = reflectivity correction



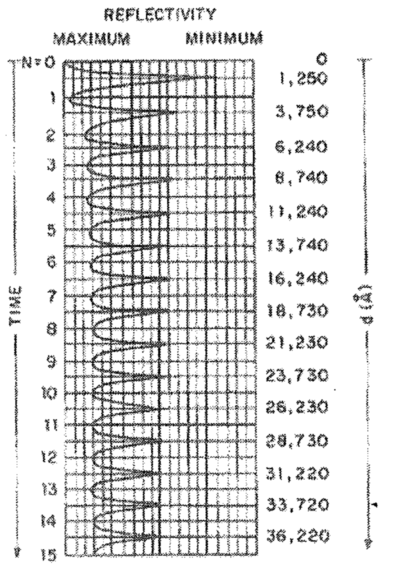


Fig. 57 Recorder trace of optical-thickness monitor shown in Fig. 56 for the deposition of RF sputtered SiO_2 on silicon (λ = 5,500 Å; θ = 79°).