

CNEN/SP

ipen **Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares**

TECNOLOGIA DE FILMES FINOS

Nilson Dias Vieira Junior Ermelindo Ambrósio e Spero Penha Morato

PUBLICAÇÃO IPEN 94

JANEIRO/1986

SÃO PAULO

ISSN 0101 3084

PUBLICAÇÃO IPEN 94

JANEIRO/1988

TECNOLOGIA DE FILMES FINOS

Nilson Dias Vieira Junior Ermelindo Ambrósio e Spero Penha Morato

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS ESPECIAIS



CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - BRASIL

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

A13 30

ANTIREFLECTION COATINGS
COATINGS
LASER CAVITIES
LASER MIRRORS
OPTICS
QUANTUM ELECTRONICS
VAPOR DEPOSITED COATINGS

TECNOLOGIA DE FILMES FINOS

Nilson Dias Vieira Junior, Ermelindo Ambrosio e Spero Panhe Morato

RESUMO

Foi implantado no Departamento de Processos Especiais um laboratório de produção de filmes finos para aplicações ópticas na pesquisa ou na indústria. O desenvolvimento desta competência técnica foi uma consequência da necessidade interna de obtenção de espelhos dielétricos para lasers, filtros de interferência e camadas antirrefletoras em janelas e lentes. Estes componentes ópticos já são produzidos de forma rotineira e a física destes processos é descrita no presente trabalho, bem como são apresentados resultados já obtidos com o sistema que foi instalado.

THIN FILMS TECHNOLOGY

ABSTRACT

It was implanted a thin films deposition facility in the Special Process Department. The main purpose for this was to produce optical coatings for research and development due to our needs of high reflectance coatings for laser mirrors as well as antireflecting coating and special optical filters. The paper describes the basic physics underlying their manufacturing and the facilities for the production of these coating. Results on some of the routinely produced coatings are also described.

I INTRODUÇÃO

Para o estudo de fenômenos ópticos é essencial a utilização de elementos simples como lentes ou elementos de alta sofisticação como redes de difração, filtros de alta resolução, polarizadores, etc. Um grande avanço no desempenho desses elementos foi conseguido com a utilização de filmes finos para controlar a refletividade desses elementos em faixas espectrais definidas e com dependência na sua polarização. A utilização de filmes finos em superfícies ópticas vai desde a deposição de uma camada até conjuntos de cinquenta ou mais camadas, dependendo do tipo de aplicação desejada. Em particular, filmes finos tem um papel extremamente importante na parte óptica de ressonadores para a obtenção de lasers, onde a refletividade dos espelhos e dos elementos ópticos internos ao ressonador devem ser obtidos com o maior rigor. Para a obtenção desses filmes foi implantado na APE um laboratório de evaporação de filmes finos, onde procura-se adaptar e desenvolver essa tecnologia.

II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para se determinar o efeito de filmes finos sobre um dado material, chamado normalmente de substrato, consideremos inicialmente a incidência de uma onda plana sobre um meio de índice de refração n_1 proveniente de um meio de índice de refração n_0 . Consideremos os meios envolvidos como ser

do isotrópicos e homogêneos. Aplicando as equações de *Maxwell* e as condições de contorno que ditam a continuidade de E e H campos elétrico e magnético respectivamente obtemos a seguinte relação para a refletividade⁽¹⁾

$$R = \frac{E_r E_r^*}{E_i E_i^*} = r r^* \quad (1)$$

onde

$$r = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (2)$$

na incidência normal a transmissão T é dada por

$$T = 1 - R$$

para substratos e filmes não absorventes. Para o caso de uma interface ar/vidro ($n_1 = 1.5$) a refletividade é da 4% por interface independente do comprimento de onda (Figura 1)

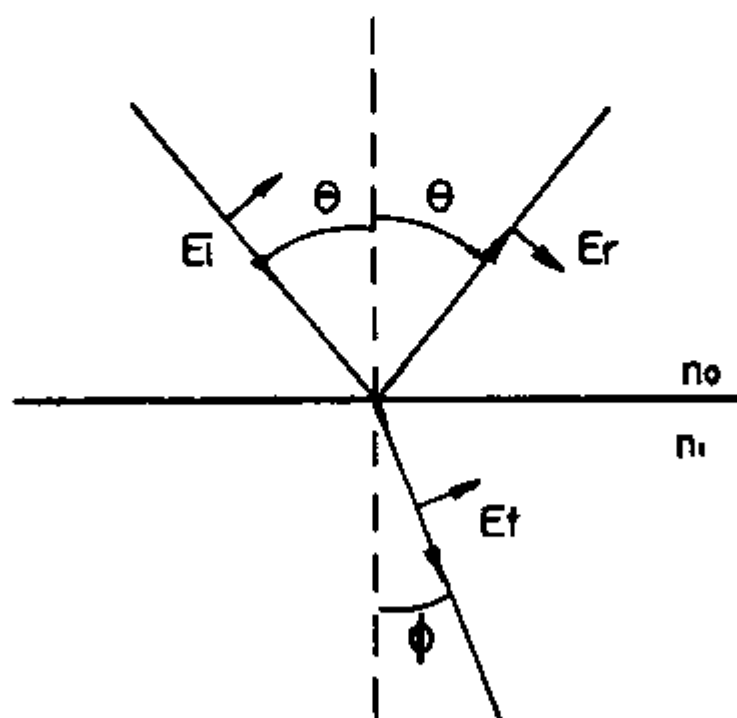


Figura 1 – Diagrama da Configuração de Campos na Interface de Meios com Índice de Refração n_0 e n_1 , θ = Ângulo Incidente, ϕ = Ângulo Refratado, E = Amplitude do Campo Elétrico

No caso de um único filme não absorvente ocorrem fenômenos de interferência devido as múltiplas reflexões dentro do filme como pode ser visto na Figura 2

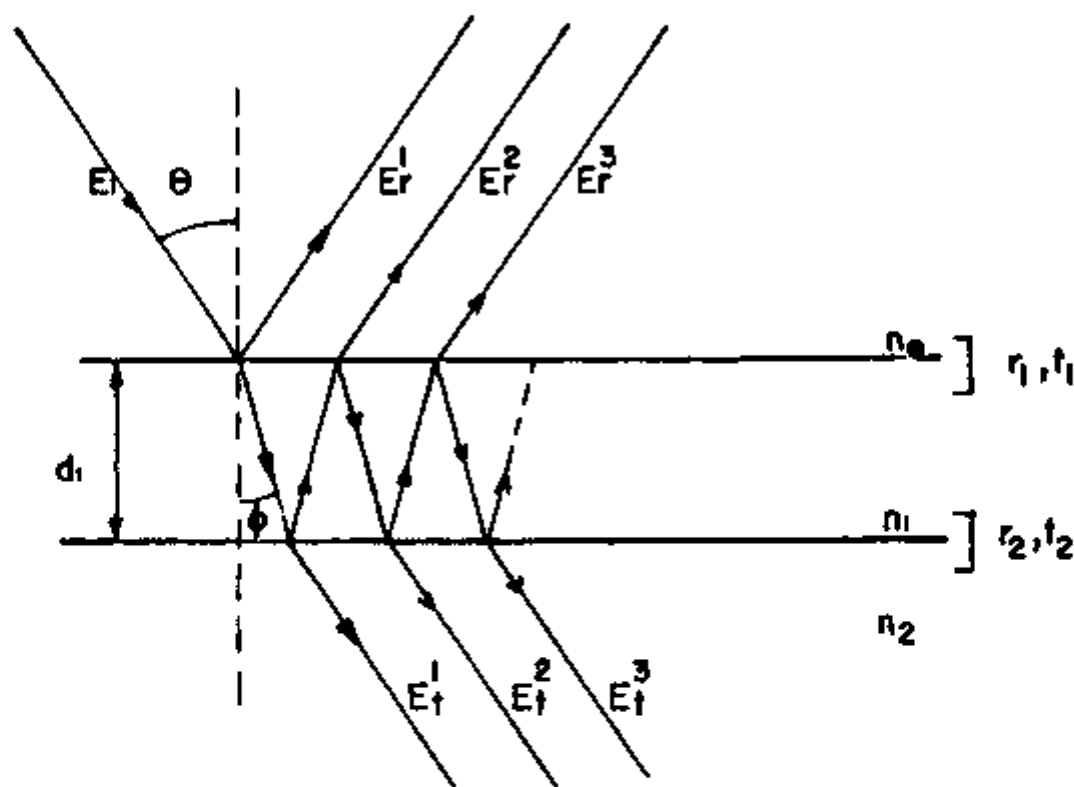


Figura 2 - Diagrama da Configuração de Campos de um Filme de Espessura d_1 e Índice de Refração n_1 , Separando Meios de Índice de Refração n_0 e n_2 . E Designa as Várias Amplitudes de Campo Elétrico

Os campos elétricos refletidos são definidos por

$$E_r^1 = E_i r_1$$

$$E_r^2 = t_1 t_2 r_2 \exp(-2 \delta_1) \quad (3)$$

$$E_r^3 = t_1 t_2 r_2^2 r_1 \exp(-4 \delta_1)$$

onde

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos(\phi_1) \quad (4)$$

onde δ_1 é a diferença de caminho óptico pelo percurso da onda dentro filme

Calculando-se a soma dos campos elétricos resultantes e tomando-se a razão dos vetores de Poynting incidente e refletido tem-se

$$R = \frac{r_1^2 + 2 r_1 r_2 \cos(2\delta_1) + r_2^2}{1 + 2 r_1 r_2 \cos(2\delta_1) + r_1^2 r_2^2} \quad (5)$$

onde

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad , \quad t_1 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad , \quad t_2 = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

Dessa expressão uma relação interessante é obtida para filmes de espessura tal que na incidência normal

$$n_1 d_1 = \lambda/4 \quad (7)$$

(filmes de um quarto de onda. Nesse caso $\delta_1 = \pi/2$ e a relação 5 se torna

$$R = \left(\frac{r_1 - r_2}{1 - r_1 r_2} \right)^2 \quad (8)$$

Dessa expressão obtém-se que se $r_1 = r_2$ a refletividade é NULA. Essa condição impõe que

$$n_1^2 = n_0 n_2 \quad (9)$$

Para materiais como o vidro com índice de refração $n_2 = 1.5$ e sendo $n_0 = 1.0$ tem-se que $n_1 = 1.22$. Na prática ainda não se dispõe de materiais com propriedades adequadas isto é não absorventes com boa aderência e resistente a abrasão com esse índice de refração. É necessário se utilizar materiais com índice de refração aproximado que deixam uma refletividade residual.

Da mesma maneira que se pode diminuir a refletividade pode-se aumentá-la aumentando-se o índice de refração do filme sendo que os materiais existentes impõe o limite dessa aplicação.

Para um maior número de camadas r o tratamento teórico é feito por matrizes^(2,3) onde se toma a relação entre os vetores elétrico e magnético de uma onda plana num dado meio e dessas relações obtém-se

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^r \begin{bmatrix} \cos \delta_j & (i \sin \delta_j)/\eta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde η_s é o índice de refração do substrato

onde as grandezas acima usadas já foram descritas para um filme na relação 4. A expressão da refletividade obtida é

$$R = \frac{(\eta_0 B - C) \times \text{complexo conjugado}}{(\eta_n B + C) \times \text{complexo conjugado}} \quad (11)$$

onde $\eta_0 = n_0 / \cos(\phi_0)$ para ondas com campo elétrico contido no plano de separação dos meios e $\eta_0 = n_0 \cos(\phi_0)$ para campo magnético contido no plano de separação. Para efeitos computacionais essa abordagem é bastante adequada pois envolve multiplicação de matrizes 2×2 .

A partir dessa análise pode-se determinar as configurações para reduzir ou aumentar a refletividade de uma dada superfície.

De particular interesse são os desenhos de filmes de duas camadas em que se pode obter refletividades nulas em comprimentos de onda bem determinados. Para isso utiliza-se camadas com espessura múltipla de um quarto de onda. Nessa condição se a relação

$$n_1^2 = n_2^2 \cdot n_0/n_s$$

for obedecida tem-se uma refletividade nula em $\lambda_0 = 4 \cdot n_1 \cdot d$. Essa configuração é chamada tipo V (4) como mostrado na Figura 3.

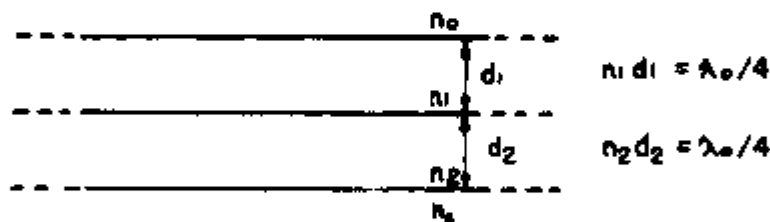


Figura 3 – Disposição de Filmes para a Construção de um Anti Refletor Tipo V. A Espessura das Camadas é de um Quarto de Onda. n_i = Índices de Refração dos Vários Meios.

Existem ainda outros tipos de coatings de 2 camadas onde a relação de espessura é de maneira tal que haja o casamento dos índices de refração e a obtenção de refletividade nula. Uma aplicação que produz uma região de baixa refletividade e apresenta 2 zeros na refletividade é obtida quando os filmes obedecem a relação

$$n_1 \cdot d_1 = \lambda_0/4 \quad \text{e} \quad n_2 \cdot d_2 = \lambda_0/2 \quad (12)$$

Uma combinação mais atraente é obtida por uma configuração de três filmes de índices de refração que obedecem a relação

$$\begin{aligned} n_1 \cdot d_1 &= \lambda_0/4 \\ n_2 \cdot d_2 &= \lambda_0/2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$n_3 \cdot d_3 = \lambda_0/4$$

$$n_1^2 \cdot n_3 = n_2^2 \cdot n_0 \quad (14)$$

Com essa combinação é possível se obter refletividades inferiores a 0.5% em uma região espectral bastante ampla. Em particular pode-se diminuir a refletividade em todo o espectro visível.

Além desses casos é interessante mencionar que para a obtenção de espelhos altamente refletivos usa-se alternar filmes de materiais com alto e baixo índice de refração todos com espessura de um quarto de onda. O máximo de refletividade para esse conjunto (Figura 4) é dado pela expressão

$$R = \left(n_s - \frac{(n_H)^{2n}}{(n_L)^{2n-1}} \right) - \left(n_s + \frac{(n_H)^{2n}}{(n_L)^{2n-1}} \right) \quad (15)$$

onde n é o número de camadas de índice de refração alto. A região de alta refletividade coberta por essa configuração compreende uma meia largura dada a seguir⁽²⁾

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (16)$$

Dessa maneira além de se poder obter espelhos de alta refletividade pode-se ainda obter transmissões controladas com intervalos de refletividade determinados.

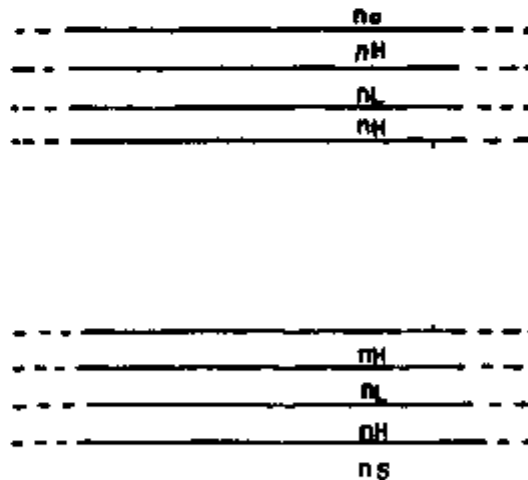


Figura 4 - Esquema de uma Configuração Altamente Refletora de Filmes com Espessura de um Quarto de Onda. n_H = Índice de Refração Alto. n_L = Índice de Refração Baixo.

Podem-se ainda obter filtros de banda passante com combinações de camadas com espessuras (oitavo de onda/quarto de onda/oitavo de onda) que podem assumir a forma

$$n_H / n_L / n_H - \text{filtros passa alta}$$

$$n_L / n_H / n_L - \text{filtros passa baixa}$$

Uma das maiores aplicações de filmes finos é na confecção de filtros tipo FABRY PEROT⁽⁵⁾ que contém basicamente dois conjuntos de camadas refletoras separados por um meio de espessura de meia onda. Esses filtros podem apresentar até uma meia largura de 3nm com transmissões maiores que 50%.

III ARRANJO EXPERIMENTAL

Dentre as técnicas possíveis para a produção de filmes finos a que possui maior facilidade de utilização e reprodutibilidade qualidade dos filmes obtidos é a de evaporação em alto vácuo⁽⁶⁾. Para isso o laboratório conta com um evaporador comercial que consiste de um sistema de alto vácuo produzido por um conjunto de bombas difusora e mecânica convencional que bombeiam uma campanula onde está disposto o sistema de evaporação. Para evitar a contaminação do sistema existe um cold trap entre o conjunto bombeador e a campanula. Esse sistema permite atingir uma pressão de até 5×10^{-6} torr em duas horas de bombeamento. Um esquema do conjunto encontra-se na Figura 5.

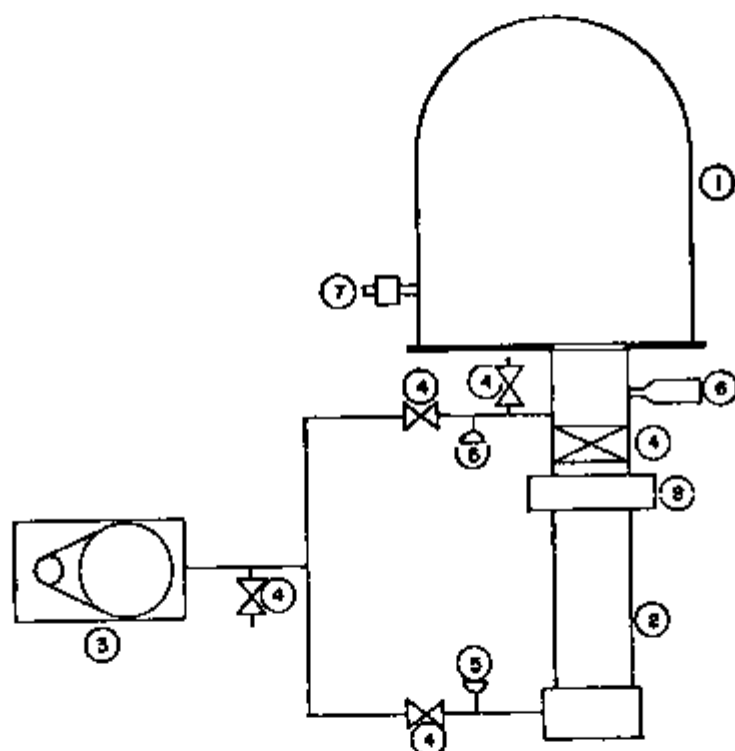


Figura 5 – Desenho Esquemático do Sistema de Vácuo do Evaporador 1) Campânula 2) Bomba Difusora 3) Bomba Mecânica 4) Válvulas 5) Termopares 6) Medidor Bayard Alpert 7) Medidor Penning 8) cold trap e baffle

O sistema de evaporação consiste de

- a fontes de evaporação
- b sistemas geométrico de suporte dos substratos
- c sistemas de monitoração da deposição dos filmes
- d sistema de aquecimento dos substratos e de medição de temperatura
- e limpeza de substratos por glow discharge

A FONTES DE EVAPORAÇÃO

Para cada tipo de material a ser evaporado e para cada tipo de aplicação devem ser utilizados fonte e cadinho adequados⁽⁷⁾. Para a maior parte dos materiais de evaporação utilizados em aplicações de filmes finos em óptica é suficiente que se utilize fontes de aquecimento resistivo ou por feixe de elétrons.

A fonte de aquecimento resistivo é mais adequada para materiais de baixa temperatura de evaporação (definida como sendo a temperatura tal que a pressão de vapor de material é da ordem de 10^{-7} torr) e que não reagem quimicamente com o cadinho. Nesse método uma massa de material é colocada num cadinho e o conjunto é aquecido pela passagem de corrente elétrica. A vantagem desse método é que a fonte como um todo se aquece e normalmente o material se funde tendo uma emissão bastante uniforme. A principal desvantagem é contaminação do filme devido ao aquecimento do cadinho assim como a possível reação química entre o cadinho e o material a ser evaporado. O sistema que dispomos pode dissipar até 6kW de potência.

Dispomos além do aquecimento resistivo de cinco fontes de evaporação por feixe de elétrons que permite o aquecimento localizado do material a ser evaporado e pode dissipar potências de até 2KW. Essa potência é suficiente para evaporar materiais como tungstênio e carbono podendo alcançar temperaturas de até 3500°C .

Devido a alta potência dissipada no aquecimento por feixe de elétrons pode ocorrer em alguns casos a dissociação das moléculas do material a ser evaporado. O controle dessa potência é importante para determinar a taxa de deposição e para taxas baixas esse tipo de evaporação apresenta algumas dificuldades. Além disso seu feixe é localizado podendo modificar a forma da fonte durante a evaporação dificultando a monitoração da espessura do filme. Esse problema pode ser contornado variando-se a região do material exposta ao feixe. Uma vantagem associada a esse método de evaporação é que somente o material a ser evaporado é aquecido permitindo a obtenção de camadas de alta pureza. Um esquema da montagem do sistema é mostrado na Figura 6.

B SISTEMA DE MONITORAÇÃO DA ESPESSURA DOS FILMES DEPOSITADOS

O método que dispomos para a determinação da espessura dos filmes depositados é o da medida da variação de frequência de um cristal oscilador. Esse cristal tem uma frequência própria de vibração que é função de sua espessura e essa frequência é alterada linearmente com a deposição de um filme sobre sua superfície. A medida dessa variação é feita e determina-se a espessura do filme depositado⁽⁸⁾. No caso o cristal apresenta uma resolução de $0,1 \text{ nm/cm}^2$ o que é suficiente para a utilização em aplicações ópticas onde erros de até 1% são tolerados na maior parte dos casos⁽⁹⁾. A vantagem desse sistema de medida de espessura é a sua grande precisão e linearidade o que permite facilmente o controle da taxa de evaporação. A taxa de evaporação influencia a compactação dos filmes o que determina o índice de refração da camada e portanto a espessura óptica. O controle dessa taxa é importante para se obter reprodutibilidade na evaporação⁽¹⁰⁾. Essa é a maior limitação para esse tipo de medida pois é necessário calibrar o sistema cuidadosamente para relacionar a espessura física com a espessura óptica inclusive levando em consideração a variação do índice de refração mesmo quando expostos a atmosfera⁽¹¹⁾. Além disso é citado na literatura⁽¹²⁾ que certos materiais tem uma mudança de índice de refração dependente da sua espessura física que deve ser considerada na confecção dos mesmos.

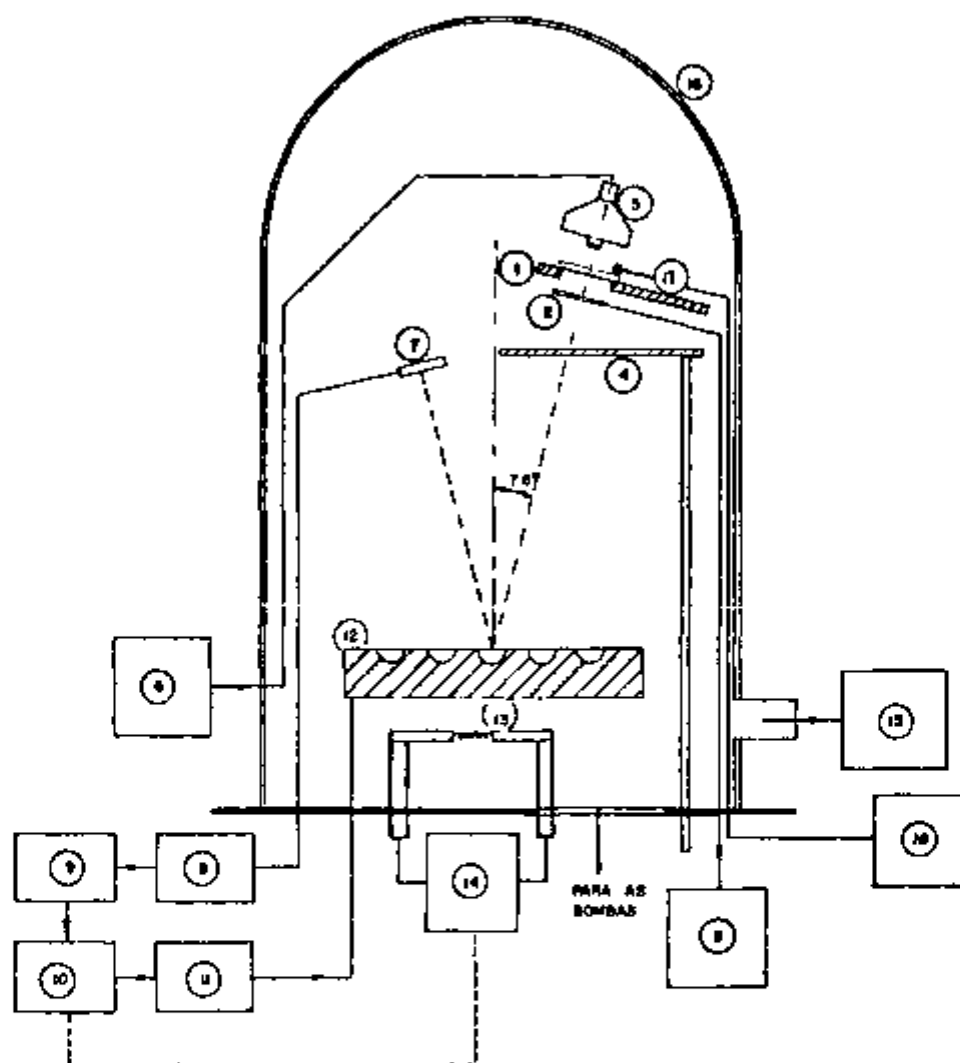


Figura 6 - Desenho Esquemático da Geometria de Evaporação 1) Porta Substrato 2) glow discharge 3) Fonte de Alta Tensão 4) Obturador 5) Aquecedor de Substratos 6) Fonte de Corrente 7) Cristal Oscilador 8) Pré Amplificador e Monitor de Espessura 9) Programador 10) Controlador 11) Fonte de Feixe de Elétron 12) Cadinhos para Evaporação por Feixe de Elétron 13) Cadinho para Evaporação por Aquecimento Resistivo 14) Fonte de Corrente 15) Medidor Penning 16) Campanula 17) Termopar 18) Milivoltímetro

C SISTEMA GEOMÉTRICO DE SUPORTE DOS SUBSTRATOS

Para suportar os substratos uma base giratória foi construída de maneira a permitir o posicionamento de um substrato por vez e que pode conter até 8 substratos. Dessa maneira pode se trocar o substrato a ser exposto ao feixe sem ser necessário a quebra do vácuo. Esse sistema garante uma posição simétrica entre o monitor de espessura e o substrato. Esse posicionamento foi necessário devido a variações da geometria de evaporação quando um material é evaporado por feixe de elétrons. Nessa simetria cilíndrica tanto o monitor como o substrato estão sujeitos as mesmas variações de fluxos do feixe e portanto a relação entre a espessura medida e a espessura obtida no substrato é mantida.

O sistema ainda permite um controle do tempo de exposição do substrato ao feixe pela utilização de um obturador automático que somente atua sobre o substrato. Isto possibilita ao monitor o acompanhamento da evaporação tanto no processo de desgasificação da fonte como após a obturação do feixe.

D SISTEMA DE AQUECIMENTO DE SUBSTRATO

A utilização de um sistema de aquecimento de substratos é necessário para o controle da condensação do filme durante a evaporação^[13]. Assim como a taxa de deposição a temperatura do substrato influencia fortemente o processo de condensação afetando a compactação do filme e portanto a calibração do sistema além da modificação das propriedades mecânicas do mesmo tais como a sua durabilidade^[14]. Com esse sistema pode-se ainda aquecer o substrato antes da evaporação para desgasificá-lo aumentando assim a aderência dos filmes. O controle de temperatura é feito por meio de um termopar em contacto com o substrato.

E LIMPEZA DE SUBSTRATOS POR GLOW DISCHARGE

Para aumentar a aderência dos filmes sobre os substratos utiliza-se uma limpeza por descarga incandescente (glow discharge). Para produzir esse plasma de limpeza no nosso sistema a pressão deve estar em torno de poucas centenas de torr e uma tensão de aproximadamente 1 500V deve ser aplicada gradualmente formando o plasma. Os íons que são contidos nesse plasma chocam-se com a superfície do substrato transferindo energia para as moléculas adsorvidas liberando-as e portanto preparando uma superfície limpa para posterior deposição do filme^[15]. Esse tratamento dura da ordem de 30 minutos.

Os filmes produzidos usando-se as técnicas descritas acima são caracterizados pela medida do espectro de transmissão com a utilização de um espectrofotômetro Cary 17 D que permite medidas no intervalo espectral de 200 nm até 3000 nm com uma resolução de até 0,1 Å. Para se efetuar medidas na região do infravermelho utiliza-se um espectrofotômetro Perkin Elmer modelo 180 que cobre o intervalo espectral desde 2,5 μ até 180 μ . Deve-se salientar que para caracterizar completamente os filmes deve-se medir também os espectros obtidos por reflexão^[2].

IV RESULTADOS

Dentre os materiais dielétricos transparentes na região visível do espectro destacam-se como os que apresentam boas características ópticas e mecânicas

Tabela I

MATERIAL	ÍNDICE DE REFRAÇÃO	T FUSÃO (°C)
MgF ₂	1,38	1286
ZnS	2,3	1850
Na ₃ AlF ₆	1,35	1000
PbF ₂	1,75	855
Al ₂ O ₃	1,63	2046
ZrO ₂	2,05	2700
SiO ₂	1,46	1713
TiO ₂	2,3	1775

Além desses existem outros^(16, 17) que apresentam propriedades adequadas para formação de filmes

A calibração de alguns desses materiais foi feita evaporando-se um filme com espessura tal que apresentasse uma estrutura na região visível do espectro. Conhecendo-se o índice de refração do material sólido⁽¹⁸⁾ e medindo-se o espectro de transmissão do filme obtido, a espessura física foi determinada. Dessa maneira a espessura física foi obtida da relação 7. As constantes que relacionam o deslocamento das frequências e espessura dos filmes foi obtida para alguns materiais e encontram-se na tabela abaixo

Tabela 1)

MATERIAL	CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO
ZnS	128
MgF ₂	231
Al ₂ O ₃	180
Na ₃ AlF ₆	204
ZrO ₂	118

Um espectro típico obtido para um único filme de ZnS encontra-se na Figura 7. Nesse espectro nota-se a presença de dois máximos de refletividade nos comprimentos de onda de 735 nm e 460 nm. As refletividades obtidas foram de 31% e 35% respectivamente.

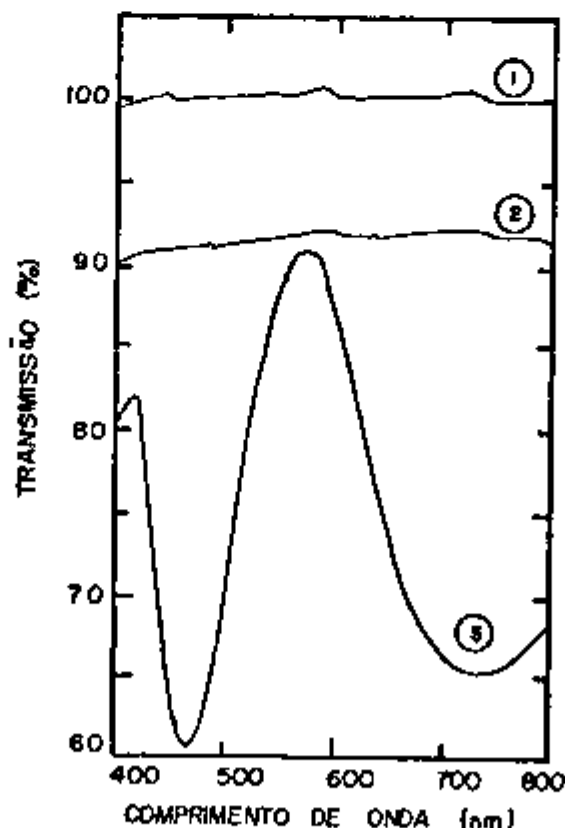


Figura 7 - Espectro de Transmissão de um Filme de ZnS Sobre um Substrato de BK7 ($n = 1,52$)
 A Curva 1 Designa a Linha de $T = 100\%$ a Curva 2 Designa a Transmissão do Substrato
 a Curva 3 é a Curva Característica do Filme

Pelos máximos de refletividade obtém-se o índice de refração com a expressão 8 para os comprimentos de onda múltiplos de quarto de onda. Obteve-se para esses comprimentos de onda os índices de refração de 2,3 e 2,4 respectivamente e portanto pela expressão pode-se obter as espessuras físicas correspondentes. Nesse caso a espessura obtida foi de 240 nm, o que corresponde a um máximo em $\lambda_0/5 = 460$ nm. Esse resultado está de acordo com a referência⁽⁹⁾ cujos autores também observaram a mudança do índice de refração com a espessura de ZnS depositada.

O espectro mostra que o mínimo de refletividade do filme não coincidiu com a refletividade apresentada pelo substrato sem o filme, o que indica que esse filme apresenta uma absorção nessa região espectral. A refletividade deveria ser coincidente e pois teoricamente

$$R_{sub} = R \cdot (\lambda_0/2n + 2) \quad (17)$$

Esse deslocamento pode ser devido a pequena absorção que o ZnS apresenta para camadas mais grossas conforme notado na referência⁽¹⁴⁾. Analogamente ao método acima foram calibrados os materiais descritos na Tabela II.

Notou-se que filmes produzidos com óxidos apresentam uma resistência mecânica extremamente alta, sendo necessário para removê-los um banho ácido ligeiramente aquecido. Já no caso do ZnS, os primeiros filmes produzidos apresentavam uma desagregação após algumas horas de exposição a atmosfera. Testes foram feitos para melhorar a aderência do filme e determinou-se que é necessário limpar inicialmente o substrato com uma descarga incandescente⁽¹³⁾ e evapora-lo com uma taxa de no mínimo 10 Å/ com feixe de elétrons⁽¹⁴⁾. Nessas condições o filme policristalino assume uma estrutura cúbica e não absorve água. Os filmes assim obtidos apresentam uma durabilidade bem maior sem maiores cuidados.

Em particular, os filmes feitos com MgF_2 apresentam ótima resistência mecânica e são usados até como protetores de camadas de alumínio (hard coating). Um detalhe especial do filme de MgF_2 é que seu índice de refração varia com a condensação do filme⁽¹³⁾ e deve-se aquecer o substrato até uma temperatura de 360°C, onde a compactação é a mais alta.

Para evaporação de outros materiais com outros intervalos de transparência, é necessário investigar sempre os melhores métodos de evaporação, a melhor taxa de formação, a temperatura de substrato e o coeficiente de dilatação térmica do filme em relação ao substrato e aos outros filmes⁽¹⁹⁾.

Com essa calibração foram feitas algumas calibrações de filmes anti-refletores para regiões espectrais bem determinadas. Um tipo muito utilizado de coating anti-refletor é o do tipo V, cujo compromisso de espessura foi obtido usando dados da ref. (4). O filme foi feito com a combinação mostrada na Figura 8. Esses materiais foram escolhidos pois não apresentam absorção apreciável na região de 250 nm até o infravermelho próximo.

Um espectro de transmissão de uma superfície com essa combinação pode ser vista na Figura 9.

O coating foi desenhado para se obter um mínimo de reflexão em 600 nm e observa-se um deslocamento do mínimo assim como uma refletividade residual de 1%. Esse efeito é devido a um compromisso não ajustado das espessuras ópticas dos filmes⁽⁴⁾. Efeitos desse tipo são principalmente causados por desvios na espessura óptica do filme de baixo índice de refração. Um desvio de somente 4% pode ocasionar esse comportamento. A provável causa desse resultado foi que o MgF_2 em contacto com o ar absorve água e adquire um índice de refração de aproximadamente 1,38, seu índice de refração no material sólido. As calibrações anteriores não levaram esse fato em consideração e portanto foi introduzido um erro no desenho.

Uma combinação de filmes mais efetiva e que cobre uma região mais ampla do espectro e que portanto permite uma margem de erro maior é do tipo encontrado na Figura 9 e apresenta dois zeros

na refletividade. Levando isso em consideração foram feitos filmes anti-refletores para um comprimento de onda de 453 nm. O espectro obtido encontra-se na Figura 9 e corresponde as duas superfícies com filmes anti-refletores. A refletividade original era de 7,3% portanto foi reduzida de 16 vezes.

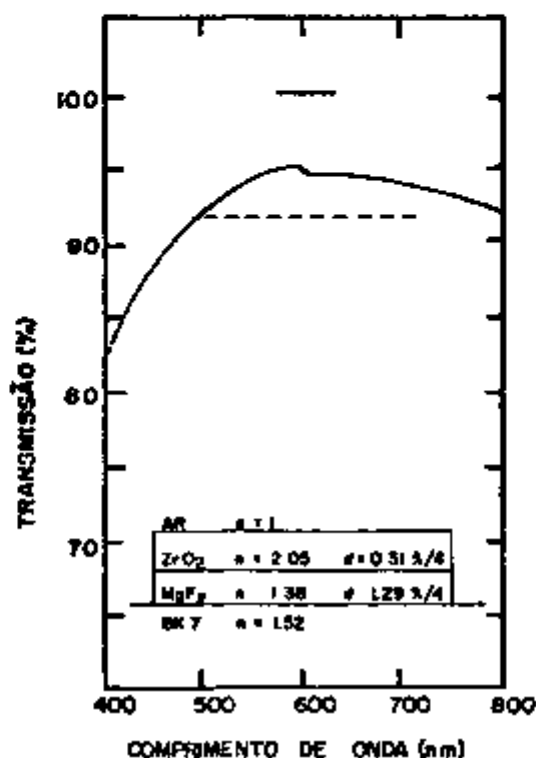


Figura 8 — Espectro de Transmissão de um Anti Refletor do Tipo V. A Curva 3 é Transmissão dos Filmes sobre o Substrato as Curvas 1 e 2 são Descritas na Figura 7. Na Inserção Está Mostrado o Esquema das Camadas.

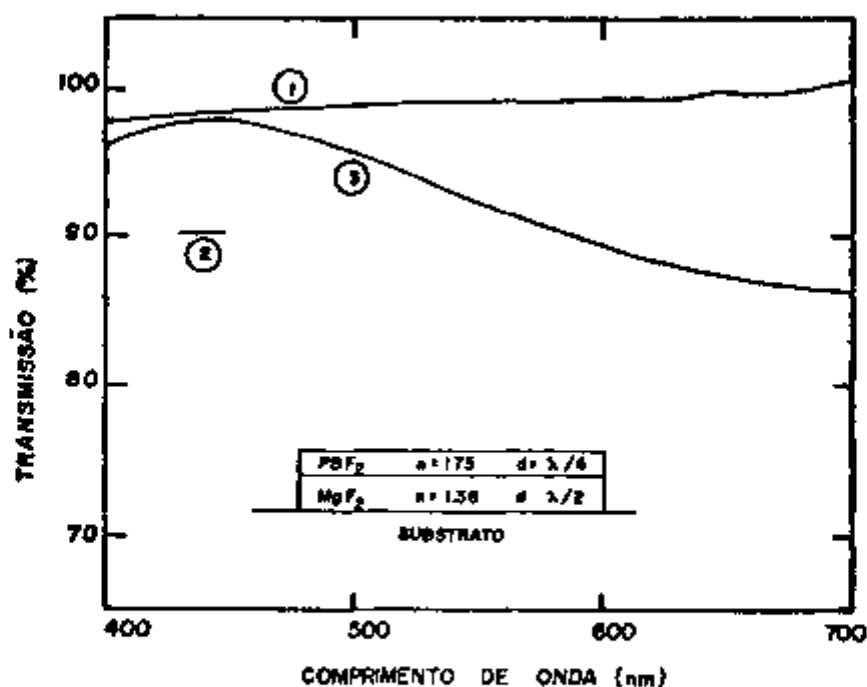


Figura 9 — Espectro de Transmissão de um Anti Refletor que Possui 2 Zeros. A Designação das Curvas é a Mesma da Figura 7. Na Inserção Está Mostrado o Esquema das Camadas.

Foi feita também essa combinação para o comprimento de onda de 350 nm e os resultados obtidos não foram tão bons. Deve-se atribuir esse resultado a qualidade da superfície do substrato e também ao tipo de limpeza utilizado⁽²⁰⁾. A refletividade residual obtida nessa região foi de 3% portanto somente um fator de 2 foi conseguido.

Uma série de outras configurações foram também confeccionadas a saber:

- a) Espelhos de alta refletividade em substratos planos. Basicamente essa configuração é do tipo substratos $/n_H/n_L/ \quad /n_H/n_L/n_H/$ ar

Foi feito um filme de nove camadas alternadas de ZnS e MgF_2 cercado por ZrO_2 na região ao substrato e próximo ao ar. O espectro de transmissão obtido encontra-se na Figura 10.

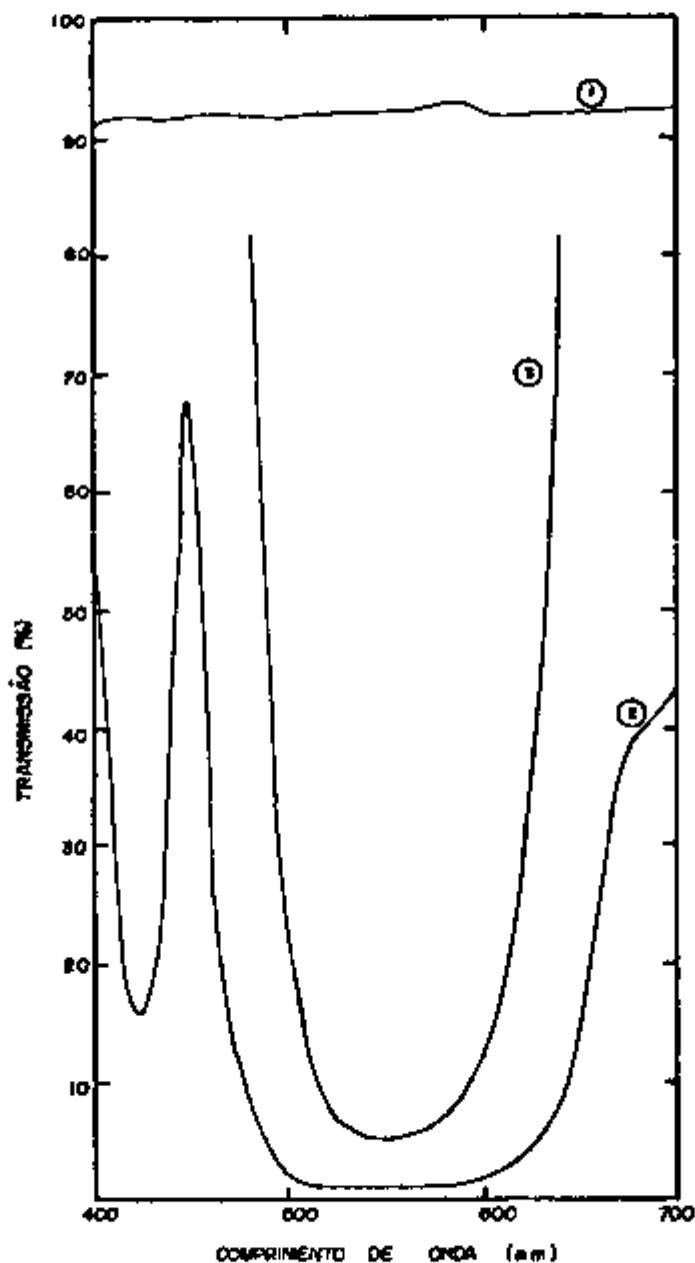


Figura 10 – Espectro de Transmissão de um Conjunto de 9 Camadas Conforme o Texto. A Curva 1 é a Transmissão do Substrato sem Coating, a Curva 2 Corresponde ao Conjunto Numa Transmissão de 0 a 100% e a Curva 3 é a do Conjunto Numa Transmissão de 0 a 10%.

Observou-se um desvio de 8% no comprimento de onda desejado mas como o filme apresenta uma largura de mais de 100 nm a refletividade esperada nesse comprimento de onda foi obtida. Além disso a refletividade máxima esperada era de 99,75% e a obtida foi de 99,25% portanto com um erro de 0,5% considerado bom para esse tipo de experimento. A transmissão de 0,75% era desejada pois esse espelho foi feito para ser usado como acoplamento de saída de um laser de baixo ganho.

- b) Espelho altamente refletor de 17 camadas que cobre a região de 350 a 500 nm (vide Figura 11). Novamente utilizou-se ZrO_2 para aumentar a aderência e a resistência do conjunto. A transmissão foi nula na região escolhida.

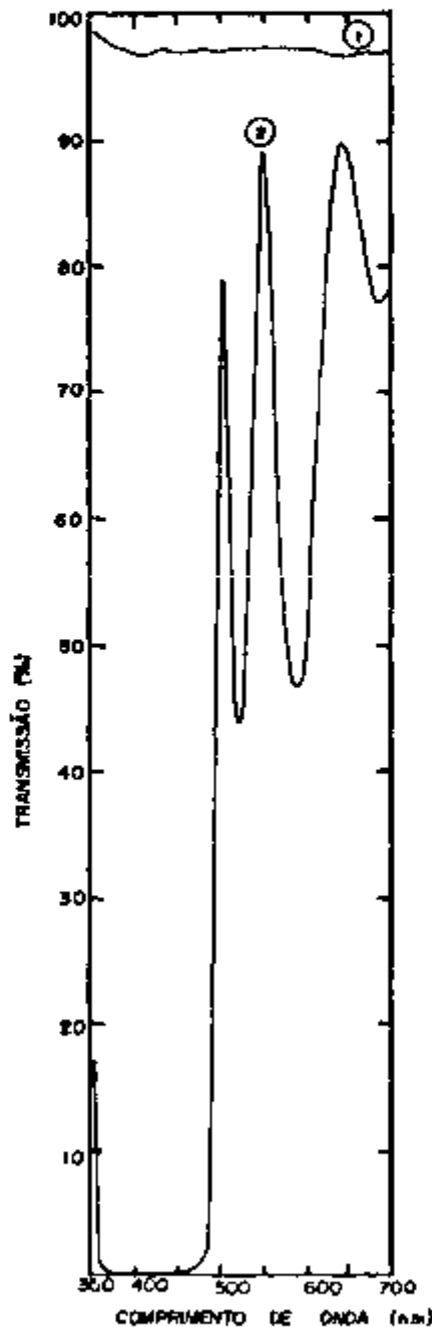


Figura 11 – Espectro de Transmissão de um Conjunto de 17 Camadas Conforme Descrito no Texto. A Curva 1 é a linha base ($T = 100\%$) a Curva 2 é a Transmissão Característica do Conjunto.

- c) Um filtro banda passante^(16 21) a o espectro encontra-se na Figura 12. O número de camadas utilizado foi 5 quando em geral é utilizado um conjunto de 30 ou mais camadas para essa aplicação. Apesar disso nota-se perfeitamente a característica de transmissão para a parte de comprimentos de onda mais altos do espectro pois o filtro foi construído para ser transmissor a partir de 450 nm. Pode-se melhorar o corte desse tipo de filtro aumentando-se o número de camadas.

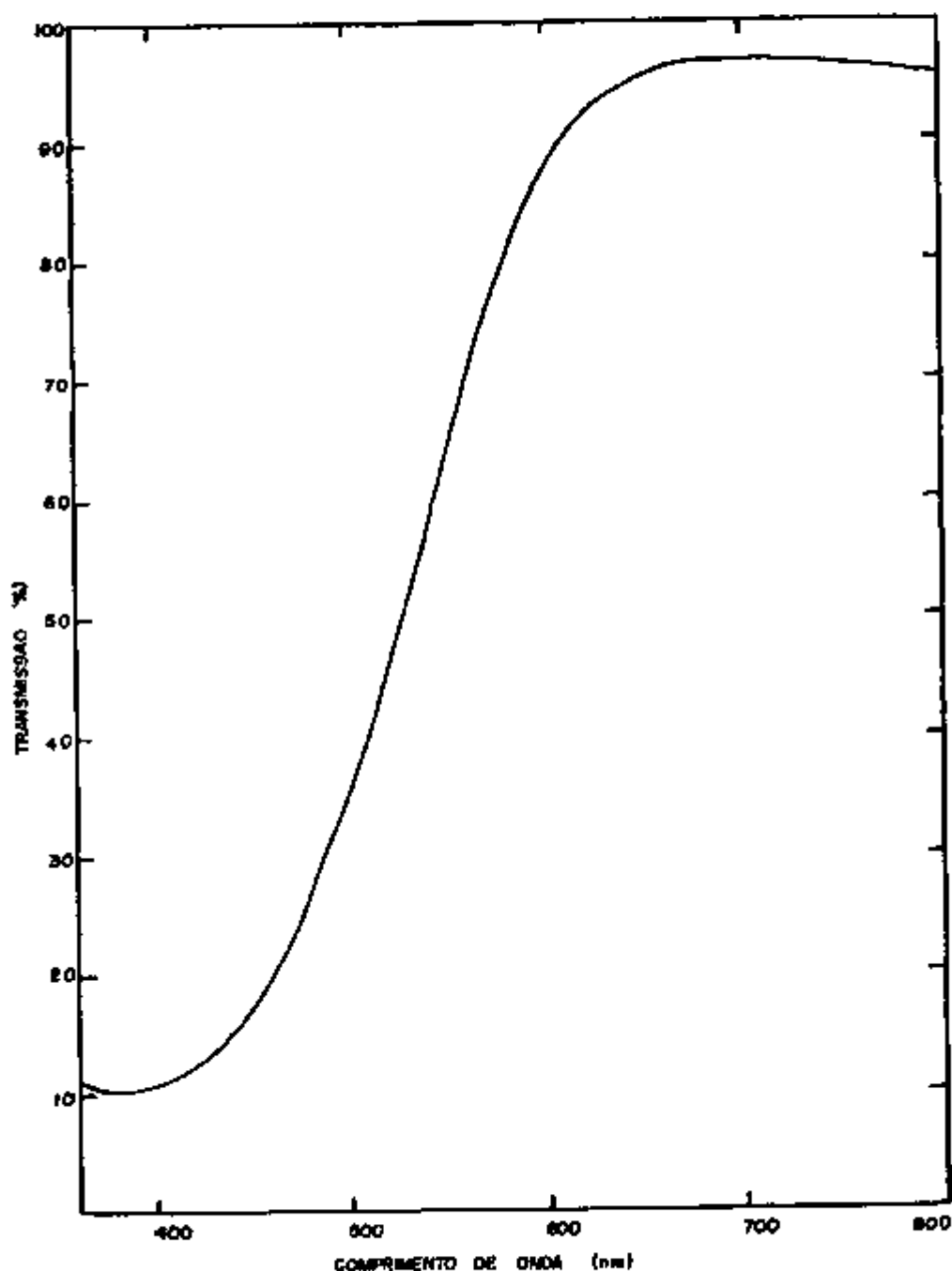


Figura 12 – Espectro de Transmissão de um Filtro na Configuração Descrita no Texto

V CONCLUSÕES

Um sistema de deposição de filmes finos por evaporação foi implantado sendo que para melhorar o controle dos filmes depositados um conjunto de acessórios foi instalado. Alguns materiais apropriados para a confecção de filmes com aplicações ópticas foram utilizados e o sistema foi calibrado de maneira a controlar a espessura óptica dessas camadas dentro de 5%. Com essa resolução produziu-se filmes anti-refletores de duas camadas que permitiram reduzir a refletividade de uma superfície por um fator de 16. Para se conseguir uma maior diminuição dessa refletividade os fenômenos físicos associados a deposição assim como a qualidade óptica das superfícies e a qualidade da limpeza devem ser mais cuidadosamente estudados. Além disso está se desenvolvendo um programa computacional para simular as várias configurações possíveis e analisar as consequências de erros na espessura física e índice de refração dos filmes. O programa já permite cálculos de refletividade para incidência normal. Configurações de camadas para espelhos de alta refletividade apresentaram uma menor dependência nesses parâmetros e conseguiu-se obter espelhos com refletividade de 99,9% sendo que espelhos metálicos só atingem a 96% na região espectral do visível. Esses espelhos já podem ser utilizados como componentes ópticos de ressonadores. Para complementar sua utilização é necessário determinar a dependência angular dessas camadas o que será permitido pelo programa computacional. Configurações mais complexas também serão estudadas e confeccionadas como a do filtro de banda passante já construído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HEAVENS O S *Optical properties of thin solid films* London Butterworths 1955 p 46-95
- 2 COUTTS T J ed *Active and passive thin film devices* New York Academic 1978 Cap 8
- 3 HASS G ed *Physic of thin solid films* New York Academic 1963 p 69-120
- 4 Hass G & THUM E R eds *Physics of thin films* New York Academic 1964 p 239-303
- 5 FOWLES G R ed *Introduction to modern optics* New York Holt Rinehart 1975 p 85-103
- 6 HEAVENS O S *Optical properties of thin solid films* New York Butterworths 1955 p 6-23
- 7 BEHRNDT K H ed *The sloan notebook* s.l. s.d (Relatório interno)
- 8 HASS G & THUM R E *Physics of thin films* New York Academic 1966 p 1-53
- 9 HEAVENS O S *Optical properties of thin solid films* New York Butterworths 1955 p 207-54
- 10 MACLEOD H A Monitoring of optical coating *Appl Opt* 20(1):82-9 1981
- 11 PULKER H K & JUNG E An investigation of the evaporation process of dielectric materials *Thin Solid Films* 4:219 1969
- 12 GUENTHER K H Physical and chemical aspects in the application of thin films in optical elements *Appl Opt* 23:3612-32 1984
- 13 RITTER E & HOFFMANN R Influence of substrate temperature on the condensation of vacuum evaporated films of MgF_2 and ZnS *J Vac Sci Technol* 6:733-5 1969
- 14 BANGERT H & PFEFFERKORN H Condensation and stability of ZnS thin films on glass substrates *Appl Opt* 19(23):3878-9 1980
- 15 HASS G & RUDOLF E T *Physics of thin films* New York Academic 1967 p 1-90

- 16 ARECCHI F T & SHULZ DUBOIS E D eds *Laser handbook* Amsterdam North Holland 1972
v 1 p 899 921
- 17 NUSSBAUM P *Contemporary optics for scientists and engineers* Englewood Cliffs N J Prentice
Hall 1975 p 182 98
- 18 WEAST R C ed *Handbook of chemistry and physics* 53 ed Boca Raton Florida Chemical
Rubber 1972 73
- 19 POLKER H K & MASER J The origin of mechanical stress in vacuum deposited MgF_2 and ZnS
films *Thin Solid Films* 59 65 76 1979
- 20 GUENTHER K H Color variations of A R coatings caused by a leached layer on the substrate
Appl Opt 20(1) 48 53 1981
- 21 THELEN A Avoidance or enhancement of polarization in multilayer *J Opt Soc Am* 70 118 21
1979

