

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA

**OBTENÇÃO DE FILMES DIELÉTRICOS  
PARA APLICAÇÕES ÓTICAS COM  
MONITORAÇÃO ÓTICA DE ESPESSURA\***

JANDIR MIGUEL HICKMANN

Dissertação realizada sob a orientação do Dr. Ricardo E. Francke e apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física.

\*Trabalho parcialmente financiado pelas seguintes instituições: Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Porto Alegre  
1988

Dedico este trabalho aos meus  
amigos, em especial a Bea, ao  
Daniel, ao Marcelo, a Regina,  
ao Ronald e a Rose.

A Nede com carinho.

"Caminante: No hay camino, se hace camino al andar..."

(Antonio Machado: Cantares)

"... hoje faço, com meu braço, meu viver."

(Milton Nascimento: Travessia)

## AGRADECIMENTOS

Acredito que uma dissertação, principalmente em física experimental, é o fruto de muitas contribuições. Quero agradecer a todos que ajudaram-me, direta ou indiretamente, através de apoio material, trabalho, incentivo e confiança.

Em particular quero agradecer ao Ricardo Correia que contribuiu na montagem experimental. Ao Daniel Coiro por seu esforço e sua vontade de aprender. Ao Carlos Oliveira por sua sempre presente disposição em ajudar. Ao Janir Hickmann pela ajuda na instrumentação. Ao Cleto Tartarelli pelos desenhos. À Central Analítica do Instituto de Química da UFRGS pelas medidas dos espectros de transmissão dos filmes. Ao Silvio Cunha pelas sugestões e discussões. Ao Ricardo Francke pela orientação. Por fim, ao Thomas Braun e a todos que leram e corrigiram os originais.

## RESUMO

Foi construído um sistema ótico para controlar a espessura de filmes finos num evaporador de alto vácuo. Foi medida a reflexão "in situ" de um filme fino depositado num substrato apropriado. O cálculo da transmissividade e refletividade de filmes dielétricos, divisores de feixes e filtros também é descrito. O problema inverso, que é obter um filme com propriedades de reflexão e/ou transmissão pré-determinadas também é analisado. Também são dados programas que calculam as propriedades de um filme fino e os desenham. Finalmente é descrita a fabricação de espelhos dielétricos para um Fabry-Perot e um divisor de feixe no evaporador de alto vácuo.

## ABSTRACT

An optical monitoring system was built to control the thickness of thin film in a high vacuum evaporator. In this system we measured the in-situ reflection from a thin film deposited on an appropriate substrate. The calculation of the transmission and reflection from a multilayer thin film as used in dielectric mirrors, beam splitters and filters is also described. The inverse problem, that is to obtain a film with predetermined reflection and transmission, is also studied. Computer program for calculating thin film and designing them are also given. Finally we describe the fabrication of Fabry-Perot dielectric mirrors and a beam-splitter in our high vacuum evaporator.

## SUMÁRIO

Introdução .....	1
1. Cálculo e Otimização de Filmes Finos .....	7
1.1. Cálculo de Filmes Finos .....	8
1.2. Otimização de Filmes Finos .....	29
1.3. Programa para Cálculo e Otimização de Filmes Finos .....	43
2. Obtenção e Monitoração de Filmes Finos .....	50
2.1. Métodos de Obtenção de Filmes Finos .....	51
2.2. Evaporação Térmica em Alto Vácuo .....	61
2.3. Monitoração Ótica da Espessura de Filmes Finos .	89
3. Montagens Experimentais e Resultados Obtidos .....	102
3.1. Sistema de Vácuo Utilizado .....	103
3.2. Montagem do Monitorador de Espessura .....	105
3.3. Montagens e Procedimentos para Evaporação .....	109
3.4. Filmes Construídos .....	113
Conclusão .....	122
Apêndice A: Listagem do Programa para Cálculo e Otimização de Filmes Finos .....	124
Apêndice B: Determinação da Espessura de uma Monocamada .....	159
Bibliografia .....	163

## INTRODUÇÃO

Os filmes finos desempenham um papel fundamental na pesquisa pura e aplicada de novos materiais e de diversos fenômenos. Muitos equipamentos e dispositivos de uso cotidiano utilizam extensamente filmes finos, em particular, dispositivos óticos.

Um dos primeiros filmes a ser utilizado em larga escala e que, de certa forma, abriu campo para outros filmes foi o de alumínio. Sua aparição deu-se pelos anos 30, quando era procurada uma técnica que permitisse aumentar a eficiência dos telescópios. Até esta data eram utilizados principalmente espelhos de uma liga metálica denominada "Especulum" e de vidro com recobrimento de prata. Os espelhos com recobrimento de prata possuem uma boa refletividade inicial, porém ela decresce rapidamente com o

envelhecimento do recobrimento. Por outro lado, os espelhos feitos com "Especulum" não têm uma boa refletividade. Os filmes de alumínio, em contraste, têm uma refletividade superior a dos de prata e uma grande duração.

A técnica para obter estes filmes evoluiu muito pouco desde o início e consiste basicamente na evaporação do metal aquecido em um filamento helicoidal de tungstênio no vácuo (Strong 1938, cap. VI). Esta técnica permite fazer filmes eficientemente e com uma alta pureza.

As aplicações para filmes finos e sua importância na pesquisa aumentou com o passar dos anos. Atualmente existem áreas tais como a indústria de circuitos integrados, em que os filmes finos são essenciais.

Entre as novas aplicações podemos destacar os filmes para escrita e leitura de dados em CDs ("compact discs"). Estes discos estão revolucionando o sistema de armazenagem de dados, graças a grande capacidade de armazenagem, da ordem de centenas de Mbytes, e a portabilidade. Designs multicamadas compostos de  $\text{SiO}_x$ , alumínio e materiais magneto-ópticos são utilizados com este propósito (Sohm 1987).

Uma outra descoberta feita na área foi o crescimento de um filme de diamante em vários tipos de substrato

(Zarowin 1986). Com o filme de diamante é possível proteger eficientemente superfícies com um material de alta qualidade, inclusive outros recobrimentos menos resistentes. Um exemplo de aplicação é a proteção da umidade de janelas de NaCl como as utilizadas em lasers de  $\text{CO}_2$ .

Entre as áreas de destaque de pesquisa encontram-se os filmes utilizados no estudo da biestabilidade ótica. Estes fenômenos poderão ser utilizados na construção de dispositivos que funcionem na região de  $10^{-12}$  a  $10^{-14}$ s e permitirão o processamento paralelo de informações (Sinitsyn 1987).

Nosso interesse está no uso de filmes finos na ótica. Nesta área encontramos uma grande sofisticação. As aplicações vão desde espelhos de alta refletividade, filtros interferenciais, espelhos frios e quentes, camadas antirefletoras, filtros de canto ("edge"), espelhos dicróicos e divisores de feixe. A pesquisa pura e aplicada é fundamental para o desenvolvimento da área, sendo especialmente importante a compreensão física dos fenômenos que influenciam nas características dos filmes construídos, para melhor controlá-los ou para fazer uso deles em novos desenvolvimentos.

Diversos materiais, que abrangem praticamente toda a tabela periódica, são usados na construção de filmes finos

para sistemas óticos. Os materiais dielétricos desempenham um papel fundamental na construção da maioria destes dispositivos óticos. Isto se deve às propriedades interferenciais que apresentam os filmes destes materiais. Sua pequena absorção permite construir filmes com muitas camadas sem uma perda apreciável de luz no filme.

Ao construirmos um espelho ou filtro, que deve possuir características em uma dada região do espectro eletromagnético, devemos levar em conta tanto o índice de refração quanto o coeficiente de absorção nesta região. Uma sobreposição adequada de camadas destes filmes, com cada camada de uma espessura determinada, pode gerar, a princípio, qualquer valor para o coeficiente de reflexão. Existem casos em que se deseja não apenas um determinado coeficiente de reflexão em um determinado comprimento de onda, mas sim em dois. Por exemplo, podemos utilizar um espelho, em um laser de corante contínuo, que transmita 100% em 514,5 nm (deixando assim passar o laser de Ar<sup>+</sup> que bombeia o laser de corante) e reflita 100% em 560 nm (para que o espelho funcione, ao mesmo tempo, como um espelho da cavidade do laser de corante). Neste caso o desenho deste filme será muito mais complexo.

O cálculo destes filmes é uma atividade muito importante, para a qual existe uma série de programas muito elaborados, inclusive a nível comercial. O cálculo pode

incluir camadas absorventes, a dispersão ótica dos materiais, etc. Os métodos utilizados para gerar designs que tenham comportamentos particulares são os mais variados. Uma das mais sofisticadas técnicas utiliza uma transformada de Fourier do comportamento desejado, produzindo um design inhomogêneo com variação contínua do índice de refração do material evaporado (Dobrowolski 1978). Para a construção de tal tipo de design é necessário ainda o pleno desenvolvimento de técnicas de coevaporação, para tornar possível um controle preciso do índice de refração com a espessura.

Outro ramo que é fundamental para o desenvolvimento da área de filmes finos para ótica é a monitoração da espessura do filme. Neste campo passos importantes foram dados com a monitoração ótica de banda larga, em que toda a região espectral de interesse é monitorada em tempo real com a variação da espessura (Vidal 1978 e Powell 1986).

Neste trabalho fazemos uma revisão geral da obtenção de filmes dielétricos para aplicações óticas, com especial atenção na evaporação térmica em alto vácuo. Descrevemos o nosso sistema experimental, os procedimentos utilizados e a nossa montagem para medir espessura.

No capítulo 1 revisamos a teoria utilizada no cálculo de filmes dielétricos pelo método da matriz característica.

Na sequência abordamos os métodos de otimização. Analisamos em profundidade um método simples de otimização, baseado na eliminação sucessiva de intervalos, e um método mais complexo, baseado no cálculo do gradiente de uma função de mérito do design. Na última secção do capítulo descrevemos as características do programa computacional, desenvolvido com base no que foi discutido antes no capítulo, para cálculo e otimização de filmes finos. A listagem do programa encontra-se no apêndice A.

No capítulo 2 descrevemos as principais técnicas de obtenção de filmes finos com vistas a aplicação em ótica. Estudamos em detalhe a evaporação térmica em alto vácuo e os parâmetros experimentais que influenciam nas características dos filmes. Ainda neste capítulo, desenvolvemos a teoria para a utilização do monitorador de espessura construído por nós.

Finalmente, no capítulo 3, tratamos das montagens e procedimentos utilizados, e dos resultados obtidos na construção de dois tipos de filmes finos representativos: esepelhos dielétricos e um divisor de feixe.

## 1. CÁLCULO E OTIMIZAÇÃO DE FILMES FINOS

Neste capítulo deduziremos as equações fundamentais para o cálculo de filmes finos a partir das equações de Maxwell e certas suposições. Estas equações são de importância fundamental para a compreensão e a determinação das características dos filmes finos. Após, faremos uma análise do problema da otimização dos filmes finos e, por fim, comentaremos um programa, desenvolvido por nós, com base na discussão precedente, para calcular e otimizar filmes finos.

## SUMÁRIO

- 1.1. Cálculo de Filmes Finos
  - 1.1.1. Diferença de Fase em um Filme Fino Monocamada
  - 1.1.2. Relação Entre os Campos em Duas Interfaces Contíguas
  - 1.1.3. A Matriz Característica
  - 1.1.4. Determinação do Fator de Reflexão e Transmissão
- 1.2. Princípio de Otimização
  - 1.2.1. Definição da Função de Mérito
  - 1.2.2. "Golden Section" e um Algoritmo Rápido
  - 1.2.3. Método do Gradiente
- 1.3. Programa Para Cálculo e Otimização de Filmes Finos

### 1.1. Cálculo de Filmes Finos

O cálculo de filmes finos multicamadas pode ser realizado de várias formas. Existe o método das fórmulas de recorrência de Rouard (Dupoisot 1979). O método da impedância (Leurgans 1951), em que o filme é considerado como uma linha de transmissão. O método da matriz característica (Abeles 1950), em que a cada camada é associada uma matriz que a caracteriza. E mais recentemente, um método que utiliza o algoritmo baseado na assim denominada matriz de propagação R (Schwartz 1987). Cada um destes métodos apresentam suas vantagens e desvantagens. Nós adotamos o método da matriz característica de Abeles por possibilitar uma boa compreensão física do problema e por ser facilmente implementável em computador.

Em nossa descrição do problema, começaremos analisando a diferença de fase, provocada por um filme

monocamada, entre a componente de uma onda eletromagnética refletida pela primeira interface do filme e a componente refletida pela segunda interface do filme. Depois analisaremos as condições de contorno nas interfaces de uma camada de conjunto de filmes finos. A seguir, mostraremos como expressar as equações que relacionam os campos incidentes e transmitidos em forma matricial e estenderemos este resultado para o conjunto de filmes finos. Por fim, mostraremos a relação entre esta matriz e o fator de reflexão e transmissão do filme.

#### 1.1.1. Diferença de Fase em um Filme Fino Monocamada

Na figura 1-1 está representada uma monocamada de um material dielétrico. Nesta figura  $n_0$ ,  $n_1$  e  $n_2$  representam, respectivamente, os índices de refração do meio de onde a onda eletromagnética incide, o índice de refração do filme e o índice de refração do substrato onde está depositado o filme. A onda eletromagnética é plana e incide fazendo um ângulo  $\theta_0$  com a normal da superfície 1. A espessura do filme é representada por  $d_1$ . Na figura são mostrados dois feixes incidentes.

A diferença de fase entre o feixe refletido pela superfície 1 e o feixe transmitido pela superfície 1 e depois refletido na superfície 2 é igual a:

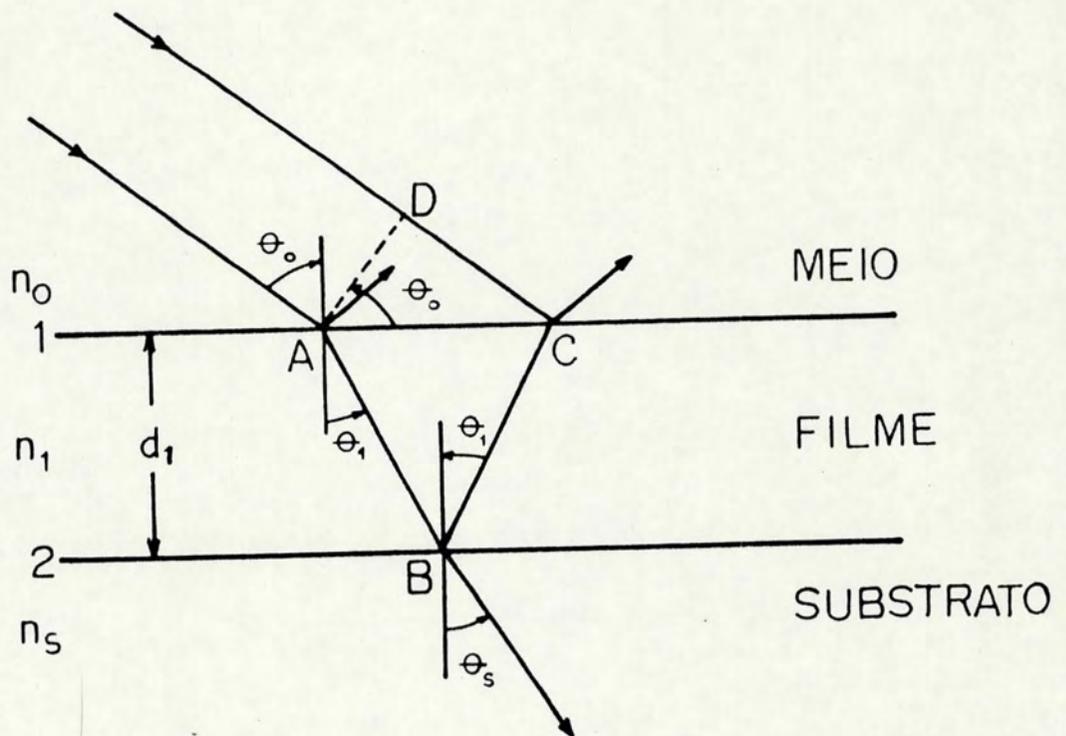


Fig. 1-1: Representação de um filme monocamada.

$$\delta = 2\pi n_1 (AB + BC - n_0/n_1 DC) / \lambda_0$$

onde AB, BC e DC são os segmentos representados na figura 1-1, e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda dos feixes incidentes, medido no vácuo.

Com o auxílio da lei de Snell e observando que o segmento DC pode ser expresso como  $2d_1 \tan\theta_1 \sin\theta_0$ , obtemos que a diferença de fase pode ser escrita como:

$$\delta = 2k_1 \delta_1 \quad (1-1)$$

onde  $k_1 = 2\pi n_1 / \lambda_0$  é o módulo do vetor de onda no filme, e:

$$\delta_1 = d_1 \cos\theta_1 \quad (1-2)$$

### 1.1.2. Relação Entre os Campos em Duas Interfaces Contíguas

Consideremos o conjunto de filmes finos da figura 1-2. Nesta figura o meio de índice de refração  $n_0$  é o meio de onde temos uma onda eletromagnética plana incidindo em nosso conjunto de filmes finos, normalmente o meio ambiente. O meio  $\underline{s}$  representa o substrato, caracterizado pelo índice

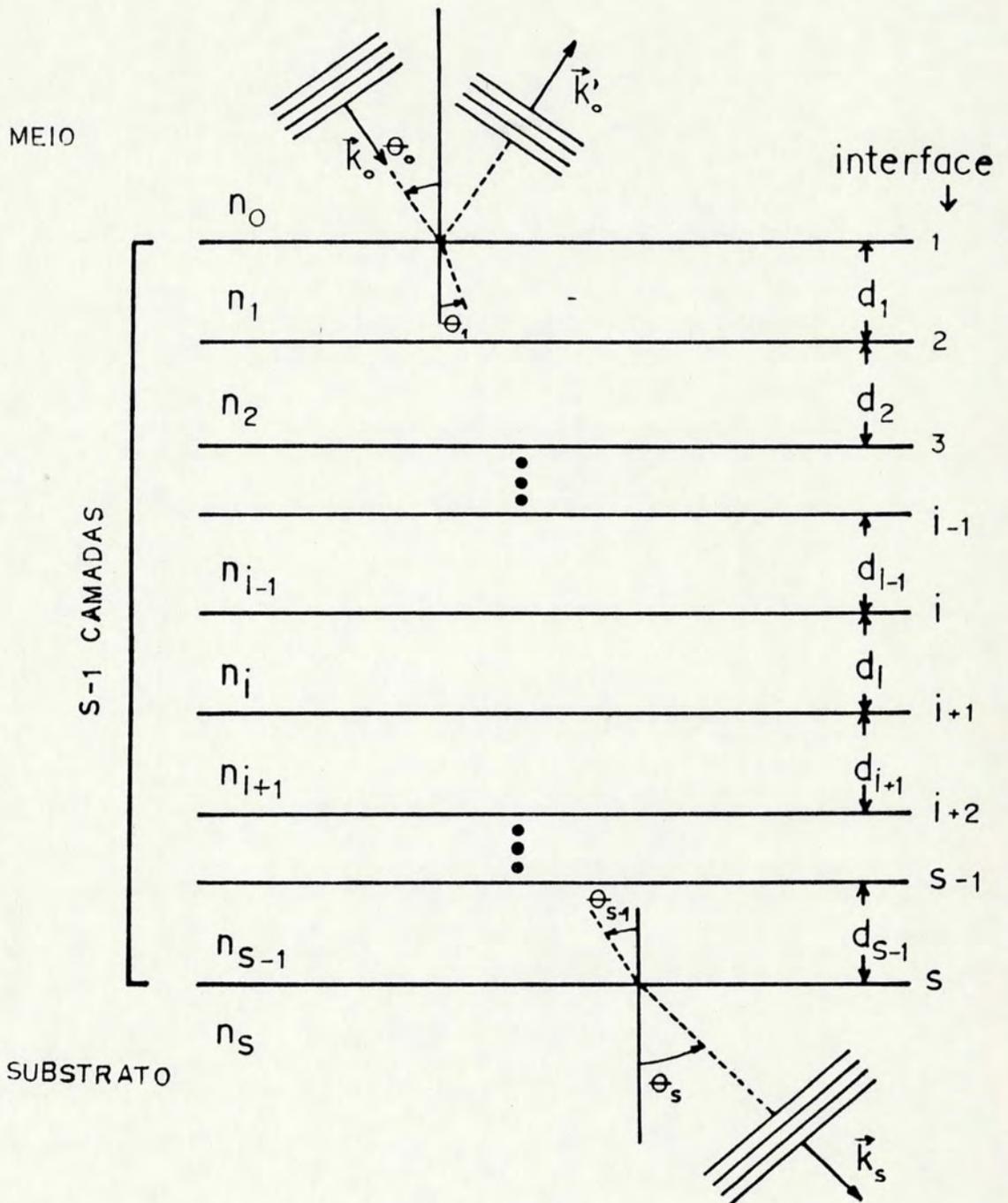


Fig. 1-2: Representação de um revestimento.

de refração  $n_s$ , onde foi depositado o recobrimento. O recobrimento possui  $s-1$  camadas. O meio e o substrato são considerados semi-infinitos para nossos propósitos.

Cada camada do recobrimento é caracterizada por dois parâmetros: a espessura  $d_i$  e o índice de refração  $n_i$ . Este último depende do material de que é constituída a camada e da estrutura com que cristalizou.

Tomemos uma camada  $i$  arbitrária do conjunto considerado, representada na figura 1-3, para analisarmos as condições de contorno dos campos elétrico e magnético nas interfaces desta camada. A onda eletromagnética, caracterizada pelo vetor de onda  $k_{i-1}$ , incide sobre a interface  $i$  vinda da camada  $i-1$ . Esta onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida pela interface.

A partir de agora, nas nossas considerações, não estamos mais tomando as ondas eletromagnéticas como feixes, mas sim estamos considerando os campos resultantes de todas as múltiplas reflexões e transmissões das ondas pelas interfaces, em uma dada direção e em toda região da interface. Isto implica que estamos considerando soluções estacionárias.

Como não estamos com incidência normal, devemos considerar as duas possíveis polarizações para onda

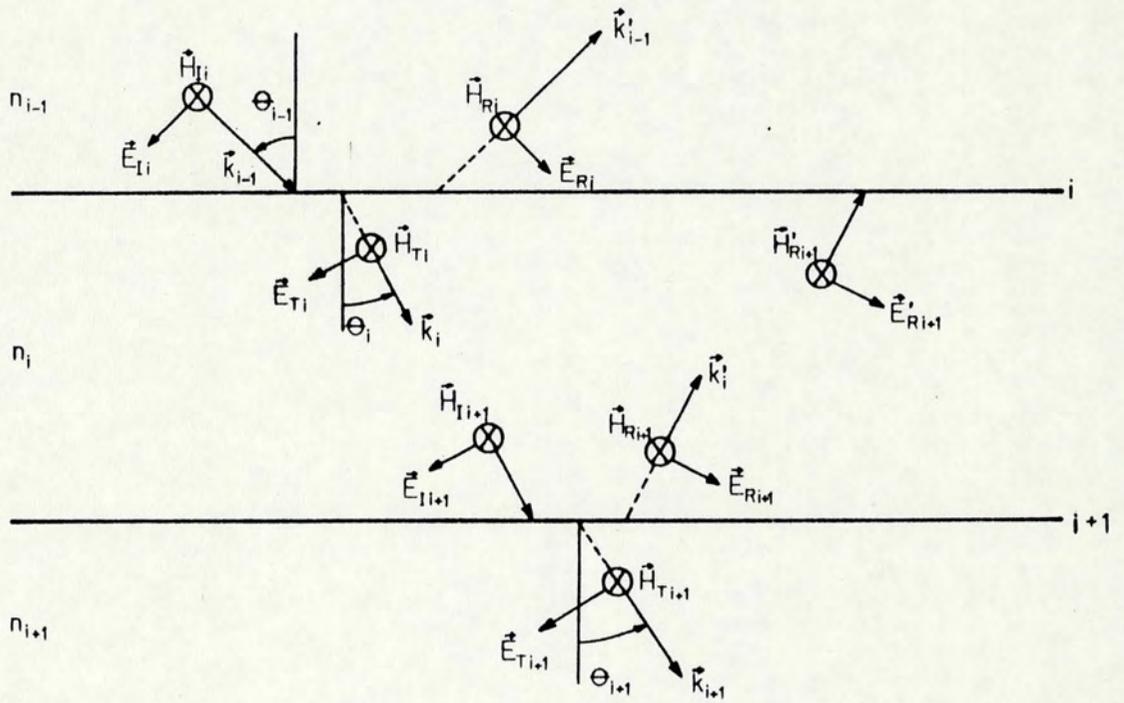


Fig. 1-3: Representação dos campos eletromagnéticos em uma camada qualquer  $i$ , para a polarização TM.

eletromagnética. Vamos, inicialmente, analisar a relação entre os campos nas interfaces  $i$  e  $i+1$ , para a polarização TM ("Transverse Magnetic"), em que o vetor intensidade magnética  $H$  é perpendicular ao plano de incidência. Esta polarização é a representada na figura 1-3.

Das equações de Maxwell podemos deduzir as condições de contorno que relacionam as componentes dos campos elétricos e magnéticos de cada lado de uma interface. Para nosso propósito é suficiente tomarmos as duas seguintes condições de contorno para os campos elétrico e intensidade magnética (Reitz 1982, 337):

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (1-4a)$$

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (1-4b)$$

Nestas equações os índices numéricos referem-se a cada um dos meios separados pela interface considerada e  $t$  indica que estamos considerando apenas a componente tangencial. Na segunda equação supomos que os meios não possuem uma condutividade infinita.

Aplicando as equações 1-4 às duas interfaces da figura 1-3 obtemos as seguintes igualdades para as componentes tangenciais dos campos:

$$E_i = (E_{I_i} - E_{R_i}) \cos \theta_{i-1} = (E_{T_i} - E'_{R_{i+1}}) \cos \theta_i \quad (1-5)$$

$$H_i = H_{I_i} + H_{R_i} = H_{T_i} + H'_{R_{i+1}}$$

e

$$E_{i+1} = (E_{I_{i+1}} - E_{R_{i+1}}) \cos \theta_i = (E_{T_{i+1}} - E'_{R_{i+2}}) \cos \theta_{i+1} \quad (1-6)$$

$$H_{i+1} = H_{I_{i+1}} + H_{R_{i+1}} = H_{T_{i+1}} + H'_{R_{i+2}}$$

onde os índices  $i$  e  $i+1$  referem-se as respectivas interfaces e os índices  $I$ ,  $R$  e  $T$  indicam, respectivamente, se o campo considerado é incidente, refletido ou transmitido pela interface. As linhas nos termos  $E'_{R_{i+1}}$  e  $H'_{R_{i+1}}$  servem para diferenciá-los dos campos  $E_{R_{i+1}}$  e  $H_{R_{i+1}}$  refletidos junto a interface  $i+1$ , pois ambos conjuntos de vetores diferem por uma fase associada ao percurso entre as duas interfaces. Os índices  $t$  de tangenciais, do primeiro termo de cada uma das equações acima, foram suprimidos para facilitar a notação.

Como supomos que as ondas incidentes são planas, da lei de Faraday podemos facilmente estabelecer uma relação entre o campo elétrico e o campo indução magnética. No Sistema Internacional de unidades, esta relação é igual a:

$$B = nk_0 \times E / c \quad (1-7)$$

onde  $k_u$  representa um vetor unitário na direção do vetor de onda  $k$ .

Fazemos uso, então, da relação entre o campo indução magnética e intensidade magnética, considerando que os filmes são constituídos de materiais não magnéticos, para reescrever as equações 1-5 e 1-6 como:

$$E_i = (E_{T_i} - E'_{R_{i+1}}) \cos \theta_i \quad (1-8)$$

$$H_i = (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_i (E_{T_i} + E'_{R_{i+1}})$$

e

$$E_{i+1} = (E_{I_{i+1}} - E_{R_{i+1}}) \cos \theta_i \quad (1-9)$$

$$H_{i+1} = (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_i (E_{I_{i+1}} + E_{R_{i+1}})$$

Note que utilizamos apenas os primeiros e últimos termos das equações 1-5 e os dois primeiros termos das equações 1-6.

Utilizaremos o resultado obtido na secção 1.1.1 para relacionarmos as componentes dos campos elétricos em cada superfície, através da diferença de fase gerada ao atravessar o filme. Expressando esta diferença de fase na forma de uma exponencial podemos escrever:

$$E_{I+1} = E_{T1} \exp(-jk_1 \delta_1) \quad (1-10)$$

$$E_{R1+1} = E'_{R1+1} \exp(jk_1 \delta_1)$$

onde exp representa a função exponencial e  $j = (-1)^{1/2}$ .

Substituindo estas equações nas equações 1-9 e resolvendo-as para  $E_{T1}$  e  $E'_{R1+1}$ , obtemos:

$$E_{T1} = \frac{1}{2} \left[ (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} \frac{H_{I+1}}{n_1} + \frac{E_{I+1}}{\cos \theta_1} \right] \exp(jk_1 \delta_1) \quad (1-11)$$

$$E'_{R1+1} = \frac{1}{2} \left[ (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} \frac{H_{I+1}}{n_1} + \frac{E_{I+1}}{\cos \theta_1} \right] \exp(-jk_1 \delta_1)$$

Utilizamos as expressões para  $E_{T1}$  e  $E'_{R1+1}$  em 1-8 e com a ajuda das relações de Euler e algumas manipulações algébricas, obteremos o seguinte:

$$E_1 = E_{I+1} \cos k_1 \delta_1 + j \frac{H_{I+1} \sin k_1 \delta_1}{Y_1} \quad (1-12)$$

$$H_1 = H_{I+1} \cos k_1 \delta_1 + j \frac{E_{I+1} \sin k_1 \delta_1}{Y_1}$$

onde

$$Y_1 = (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_1 / \cos \theta_1 \quad (1-13)$$

sendo  $Y_i$ , usualmente chamado de admitância característica do meio  $i$  (Heavens 1955, 68).

As equações 1-12 e 1-13 foram deduzidas para a polarização TM das ondas eletromagnéticas. Consideremos a polarização TE ("Transverse Electric"), em que o campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência. Na figura 1-3 isto implica em permutar os vetores dos campos  $E$  e  $H$  e inverter o sentido dos vetores  $H$ . Partimos do seguinte conjunto de equações, análogo as equações 1-5 e 1-6:

$$E_i = E_{T_i} + E'_{R_{i+1}} \quad (1-14)$$

$$H_i = (H_{T_i} - H'_{R_{i+1}}) \cos \theta_i$$

e

$$E_{i+1} = E_{I_{i+1}} + E_{R_{i+1}} \quad (1-15)$$

$$H_{i+1} = (H_{I_{i+1}} - H_{R_{i+1}}) \cos \theta_i$$

e seguindo um procedimento semelhante ao descrito para a polarização TM, chegamos a um conjunto de equações igual ao das equações 1-12, desde que redefinamos a admitância característica da camada para a polarização TE como:

$$Y_i = (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_i \cos \theta_i \quad (1-16)$$

Portanto, as equações 1-12 relacionam adequadamente os campos elétrico e intensidade magnética em duas interfaces contíguas em um conjunto de filmes finos. Este resultado é válido para ambas polarizações, sendo a admitância característica da camada calculada ou através da equação 1-13 para polarização TM ou da equação 1-16 para a polarização TE.

### 1.1.3. A Matriz Característica

As equações 1-12 podem ser mais convenientemente expressas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} E_i \\ H_i \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} E_{i+1} \\ H_{i+1} \end{bmatrix}$$

onde:

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos k_i \delta_i & j \sin k_i \delta_i / Y_i \\ j Y_i \sin k_i \delta_i & \cos k_i \delta_i \end{bmatrix} \quad (1-18)$$

A matriz  $M_i$  é denominada matriz característica e

relaciona os campos entre duas interfaces contíguas. Desde que nossa dedução foi feita para duas interfaces quaisquer, o resultado é válido para quaisquer duas interfaces contíguas. Portanto, podemos relacionar os campos na primeira interface da figura 1-2 com os campos da segunda interface. Por sua vez, estes com os da terceira interface e assim sucessivamente. Se estendemos este processo a todas interfaces do filme obtemos:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} \quad (1-20)$$

onde  $M = M_1 M_2 \dots M_{n-1}$ , é o produto das matrizes com a forma da matriz 1-18, associada a cada camada do filme. A matriz  $M$  é denominada matriz característica do filme. Para calculá-la para incidência não normal é necessária a ajuda da lei de Snell na determinação dos ângulos  $\theta_i$ , além das relações 1-13 ou 1-16, de acordo com a polarização considerada.

Nossa discussão sobre o cálculo das características dos filmes finos engloba tanto filmes absorventes quanto não absorventes, pois nenhuma suposição feita restringe que nosso filme tenha apenas camadas sem absorção. Para utilizarmos as equações para filmes absorventes devemos

apenas considerar os índices de refração como quantidades complexas, dadas por:

$$n_i = N_i - jK_i \quad (1-21)$$

onde  $N_i$  representa o índice de refração usual e  $K_i$ , a parte imaginária do índice de refração; representa o coeficiente de extinção. Certamente o cálculo da matriz característica não será trivial neste caso, pois como o vetor de onda  $k$  está relacionado com o índice de refração, também será complexo. Logo, as funções trigonométricas presentes na matriz característica serão de argumento complexo. Para incidência não normal teremos que utilizar uma generalização da lei de Snell (Reitz 1982, 380) para ângulos e índices de refração complexos. Na verdade, para filmes absorventes, é possível expressar a matriz característica de uma forma mais conveniente a fim de efetuar os cálculos (Heavens 1960), mas, como não estamos especialmente interessados em filmes com absorção, não nos deteremos nesta dedução.

Calculando o determinante da matriz característica, na forma de 1-18, vemos que o resultado é igual a unidade. O determinante do produto de qualquer número de matrizes deste tipo também é igual a unidade. Logo, o determinante de  $M$ , a matriz característica do conjunto de camadas, é igual a 1.

Quando consideramos filmes sem absorção, os termos da matriz característica na diagonal principal são reais e os termos na outra diagonal são imaginários puros. O mesmo acontece para os termos do resultado do produto destas matrizes. Esta propriedade facilita muito o cálculo das propriedades de filmes sem camadas absorptivas.

#### 1.1.4. Cálculo do Fator de Reflexão e Transmissão

O fator de reflexão de um meio é definido como a razão entre o fluxo médio de energia refletido e o fluxo médio de energia incidente no meio. Analogamente, o fator de transmissão é definido como a razão entre o fluxo médio de energia transmitido e o fluxo médio incidente no meio.

Denominemos os termos da matriz característica de um filme, resultado da adequada multiplicação das matrizes associadas a cada camada do filme, para o qual desejamos determinar o fator de reflexão, como:

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (1-22)$$

Utilizamos as condições de contorno 1-4 e a relação

1-7 e reescrevemos a equação 1-19, para a polarização TM, como:

$$\begin{bmatrix} (E_{I1} - E_{R1}) \cos \theta_o \\ (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_o (E_{I1} + E_{R1}) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{Tn} \cos \theta_n \\ (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_n E_{Tn} \end{bmatrix} \quad (1-23)$$

Escrevemos explicitamente as equações contidas em 1-23 utilizando a definição 1-22:

$$(E_{I1} - E_{R1}) \cos \theta_o = a E_{Tn} \cos \theta_n + b (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_n E_{Tn} \quad (1-24)$$

$$(\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_o (E_{I1} + E_{R1}) = c E_{Tn} \cos \theta_n + d (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_n E_{Tn}$$

Dividimos ambas equações por  $\cos \theta_o \cos \theta_n$ :

$$\frac{E_{I1} - E_{R1}}{\cos \theta_n} = (a + b Y_n) \frac{E_{Tn}}{\cos \theta_o} \quad (1-25)$$

$$Y_o \frac{E_{I1} + E_{R1}}{\cos \theta_n} = (c + d Y_n) \frac{E_{Tn}}{\cos \theta_o}$$

e definimos a admitância  $Y_o$  do meio e  $Y_n$  do substrato, para a polarização TM, como:

$$Y_o = (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_o / \cos \theta_o \quad (1-26)$$

$$Y_n = (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_n / \cos \theta_n$$

Multiplicamos a primeira equação de 1-25 por  $Y_0$ , adicionamos à segunda, resolvemos a equação resultante para a razão entre o campo transmitido e o incidente, obtendo o seguinte:

$$t \equiv \frac{E_{T_m}}{E_{I_1}} = \frac{2Y_0}{aY_0 + bY_0Y_m + c + dY_m} \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_m} \quad (1-27)$$

onde definimos um coeficiente  $t$  de Fresnel para o filme, análogo ao que encontramos no estudo da reflexão e transmissão por uma interface, e que relaciona as componentes tangenciais do campo transmitido e incidente no filme.

Isolamos  $E_{t_m}/\cos\theta_0$  em cada uma das equações 1-25, igualamos as duas equações, resolvemos para a razão entre as componentes tangenciais do campo refletido e incidente e obtemos:

$$r \equiv \frac{E_{R_1}}{E_{I_1}} = \frac{-aY_0 - bY_0Y_m + c + dY_m}{aY_0 + bY_0Y_m + c + dY_m} \quad (1-28)$$

onde  $r$  é o coeficiente de Fresnel que relaciona as componentes tangenciais do campo incidente e refletido pelo filme.

Com maior facilidade podemos obter os coeficientes de

Fresnel do filme para a polarização TE, utilizando um caminho semelhante e definindo as admitâncias para o meio e substrato como:

$$Y_o = (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_o \cos \theta_o \quad (1-29)$$

$$Y_m = (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_m \cos \theta_m$$

Os coeficientes, assim obtidos, são iguais àqueles para polarização TM, com a diferença de que, no coeficiente  $t$ , não existe a razão entre  $\cos \theta_o$  e  $\cos \theta_m$  e o coeficiente  $r$  deve ser multiplicado por  $-1$ .

Com a finalidade de obtermos os fatores de reflexão e transmissão a partir dos coeficientes  $r$  e  $t$ , utilizamos o vetor de Poynting, que representa o fluxo de energia por unidade de área e unidade de tempo. O vetor de Poynting é definido como:

$$S = E \times H \quad (1-30)$$

Estamos interessados nos fluxos médios que são refletidos e transmitidos pelo filme, portanto, tomamos a componente normal do vetor de Poynting, mediada no tempo, lembrando ainda que (Reitz 1982, 354):

$$\overline{(E^2)} = \frac{1}{2} (E \cdot E^*) \quad (1-31)$$

onde o asterisco representa o complexo conjugado. Então escrevemos:

$$\bar{S} = \frac{1}{2} (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) \mathbf{k}_u \quad (1-32)$$

Utilizando as definições para coeficiente de reflexão e transmissão, dadas no início desta secção, e com o auxílio dos coeficientes de Fresnel, dados acima, temos que:

$$R = \frac{\mathbf{u} \cdot \overline{S_{R1}}}{\mathbf{u} \cdot \overline{S_{I1}}} = r r^* \quad (1-33a)$$

$$T = \frac{\mathbf{u} \cdot \overline{S_{Tm}}}{\mathbf{u} \cdot \overline{S_{I1}}} = \frac{n_m \cos \theta_m}{n_0 \cos \theta_0} t t^* \quad (1-33b)$$

onde  $\mathbf{u}$  representa um vetor unitário na direção normal ao filme. Estas expressões são válidas para ambas polarizações.

A energia perdida em um filme absorvente é dada pelo fator de absorção  $A$ , que está relacionado com os fatores de reflexão e transmissão pela conservação de energia no filme:

$$R + T + A = 1 \quad (1-34)$$

Determinemos, por fim, uma expressão para o fator de reflexão e transmissão para filmes não absorventes em função das admitâncias e dos termos da matriz característica do

filme. Para tanto, lembremos que neste caso os termos na diagonal principal da matriz característica são reais e os termos na outra diagonal são imaginários puros, além de todas admitâncias serem reais. Representemos a matriz característica do filme, resultado da multiplicação das matrizes referentes a cada camada do filme, como:

$$M = \begin{bmatrix} B & jC \\ jD & E \end{bmatrix} \quad (1-35)$$

Podemos escrever a seguinte expressão para o fator de reflexão e transmissão:

$$R = \frac{(EY_m - BY_o)^2 + (D - CY_o Y_m)^2}{(EY_m + BY_o)^2 + (D + CY_o Y_m)^2} \quad (1-36a)$$

$$T = \frac{4Y_o Y_m}{(EY_m + BY_o)^2 + (D + CY_o Y_m)^2} \quad (1-36b)$$

As admitâncias utilizadas tanto no cálculo das matrizes, como nas expressões 1-36, são dadas por:

$$Y_1 = (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_1 \cos \theta_1 \quad (1-37a)$$

para a polarização TE, e:

$$Y_1 = (\epsilon_o / \mu_o)^{1/2} n_1 / \cos \theta_1 \quad (1-37b)$$

para a polarização TM.

Se adicionarmos as expressões 1-36 para R e T obteremos como resultado a unidade, o que é um resultado condizente com a conservação da energia no filme.

Com estes resultados encerramos nossas considerações sobre o cálculo das grandezas que caracterizam um filme fino multicamada.

## 1.2. Otimização de Filmes Finos

Nesta secção faremos uma rápida revisão dos métodos de otimização utilizados no projeto de filmes finos. Em particular, voltaremos nossa atenção para dois métodos utilizados por nós: um baseado no algoritmo de otimização "golden section" e o outro baseado no algoritmo do gradiente. O primeiro é importante pela sua rapidez e o segundo pela sua potência.

O problema de calcular o comportamento de um filme dados os seus parâmetros, ou seja, os índices de refração, o número de camadas, espessura de cada camada, etc, é uma tarefa fácil com os atuais computadores digitais. Basta utilizarmos as equações deduzidas na secção anterior. A tarefa inversa, isto é, dado um comportamento desejado

calcular o design do filme, não é nada simples. Isto se deve ao fato do nível de complexidade das equações aumentar bastante para designs com mais de três camadas. Uma abordagem direta do problema, através da construção de um sistema de equações que possa ser resolvido analiticamente de forma exata, torna-se impossível. Além disto, não existe, necessariamente, apenas uma solução adequada para o problema e nem sempre uma solução será a mais adequada, apesar de mais próxima do desejado, se requisitar valores de índices de refração difíceis de serem conseguidos na prática.

Existem duas abordagens principais para o problema: analítica e iterativa. A abordagem analítica consiste em tentar estabelecer equações aproximadas através de, por exemplo, expansão das equações de refletividade em função do comprimento de onda. O principal problema dos métodos analíticos é que, em geral, exigem camadas com índices de refração que não são encontrados entre os materiais comumente disponíveis para evaporação, ou necessitam de um grande número de materiais, tornando a construção do filme uma tarefa muito complicada.

Como um exemplo importante desta abordagem cabe citar um programa totalmente automático, para uso em minicomputador, desenvolvido em (Dobrowolski, 1978). Ele se baseia no uso de transformadas de Fourier que geram um design inomogêneo, ou seja, um design no qual o índice de

refração varia continuamente com a espessura. Este design é aproximado por um design discreto de índices de refração, que, por sua vez, é otimizado com um processo iterativo. Este algoritmo apresenta as vantagens de não necessitar nenhum design de partida, de construir um design que tenha características quaisquer e de utilizar índices de refração mais realísticos. No entanto, mesmo assim, os designs produzidos são de difícil construção. Em geral, têm um grande número de camadas e utilizam muitos materiais diferentes na sua construção. Nesta linha também está o trabalho de (Borgogno 1978).

A abordagem iterativa parte de um design conhecido, a partir do qual são variadas as espessuras das camadas e, eventualmente, adicionadas ou retiradas algumas camadas, a fim de melhor condicionar o comportamento do filme ao esperado. O principal problema deste método é que muitas vezes o design de partida não é óbvio, necessitando-se de um método acessório para construí-lo, basear-se em experiência prévia ou ainda na tentativa e erro. Entre estes métodos, dois, atualmente, possuem maior relevância para aplicações em geral (Bloom 1981): mínimos quadrados amortecidos e método do gradiente.

O primeiro deles é oriundo do design de lentes e encontra-se descrito em (Meiron 1965). A desvantagem deste método é a necessidade de definir-se várias matrizes de

grande tamanho, o que implica na manipulação de muita memória. Além disto, existe a necessidade de se construir rotinas para trabalhar com as matrizes de forma eficiente e rápida, pois ao contrário dos minicomputadores, em geral, nos microcomputadores, estas rotinas não se encontram na biblioteca do compilador. Estes fatos tornam mais difícil a implementação deste algoritmo para microcomputadores do que o método do gradiente adotado por nós.

Por sua vez, o método do gradiente possui duas grandes vantagens sobre o método dos mínimos quadrados amortecidos (Bloom 1981, 68): não existe nenhuma restrição quanto ao número de comprimentos de onda em que se otimiza o filme em relação ao número de camadas e pode-se definir vários tipos de funções de mérito. O método do gradiente é um método clássico de otimização de problemas com várias variáveis, sendo utilizado em diversos campos. Baseia-se na determinação do gradiente da função em um ponto de partida e na determinação da melhor variação dos parâmetros a serem otimizados na direção do gradiente (ou na direção oposta se desejamos minimizar a função). O ponto gerado por esta variação é tomado como novo ponto de partida e assim sucessivamente.

Por estarmos interessados em trabalhar com poucos materiais de evaporação (não mais de três) e em um algoritmo rápido e pequeno o suficiente para utilizarmos em

um microcomputador, optamos por utilizar o método do gradiente na otimização de designs. No entanto, por desejarmos também a possibilidade de recalcular o design do filme durante a construção do filme, para corrigir eventuais erros de espessura, para o que o método do gradiente não é adequado, utilizamos, além deste, um outro algoritmo muito simples, baseado no método "golden section".

Na sequência, discutimos a vantagem da definição de uma função de mérito. Em seguida, discutimos um método de determinação de um máximo ou mínimo de uma função por experimentação, denominado de "golden section". Com este método construiremos nosso primeiro algoritmo de otimização de filmes, cuja principal característica é a rapidez. Por fim, discutiremos o método do gradiente aplicado a otimização de filmes finos.

#### 1.2.1. Definição da Função de Mérito

Na otimização de filmes finos é interessante definir uma função que represente o grau de aproximação que um design possui em relação ao comportamento desejado. Esta função denominamos de mérito do design. Existem várias possibilidades na definição de uma função de mérito. Nós utilizamos a função de mérito FM definida em (Dobrowolski 1965):

$$FM = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \frac{ABS(R\varphi - R\varphi)}{Tol_i} \right]^k \right]^{1/k} \quad (1-38)$$

onde  $R\varphi$  e  $R\varphi$  é o valor desejado e calculado para a refletividade no  $i$ -ésimo ponto dos  $m$  pontos considerados na otimização.  $Tol_i$  representa a tolerância entre o valor desejado e o calculado.

Podemos observar que, para um ponto, quando a diferença entre o valor desejado e o calculado é da ordem da tolerância, sua contribuição torna-se igual ou menor que 1. A capacidade de estabelecer tolerâncias diferentes para regiões diferentes do espectro, pode ser útil na otimização de certas classes de filmes finos, como os "edge filters".

O parâmetro  $k$  é um inteiro cuja finalidade é de variar o peso dos diversos pontos de cálculo, conforme estejam próximos ou distantes do desejado. O valor  $k=1$  é equivalente a uma aproximação linear. Já o valor  $k=2$  é equivalente a aproximação de mínimos quadrados. Valores maiores que 2 tendem a aumentar a importância dos pontos que estão longe do valor desejado e reduzir a dos que se encontram no limite de tolerância. Com uma adequada escolha do valor de  $k$  é possível, ao menos parcialmente, compensar a

não homogeneidade da função de mérito ao longo dos diversos pontos de otimização.

Notemos, ainda, que a função de mérito, conforme definida acima, possui valores ao redor de 1, quando o design aproxima-se do desejado. Isto é útil na determinação do final do processo de otimização.

### 1.2.2. "Golden Section" e um Algoritmo Rápido

O método "golden section" baseia-se na eliminação sucessiva de porções de um intervalo inicial de pesquisa, aproximando-se da região onde existe o mínimo (ou máximo) da função pesquisada. Para tanto, calculamos o valor da função em dois pontos equidistantes do centro do intervalo. Consideremos a iteração  $I_{j-1}$  para  $I_j$  (veja a figura 1-4), onde  $I$  representa um intervalo e  $j$  o número da iteração. Nela  $X_{j-1}^*$  e  $X_{j-1}$  representam os pontos limites do intervalo  $I_{j-1}$ .  $X_{j-1}$  e  $X_{j-1}^*$  representam os pontos de cálculo da função sobre o intervalo.

Como critério de seleção do novo intervalo  $I_j$ , baseado nos valores calculados da função nos pontos  $X_{j-1}$  e  $X_{j-1}^*$ , estabelecemos que se  $f(X_{j-1}) > f(X_{j-1}^*)$ , o novo intervalo será  $[X_{j-1}, X_{j-1}^*]$ , caso contrário, se

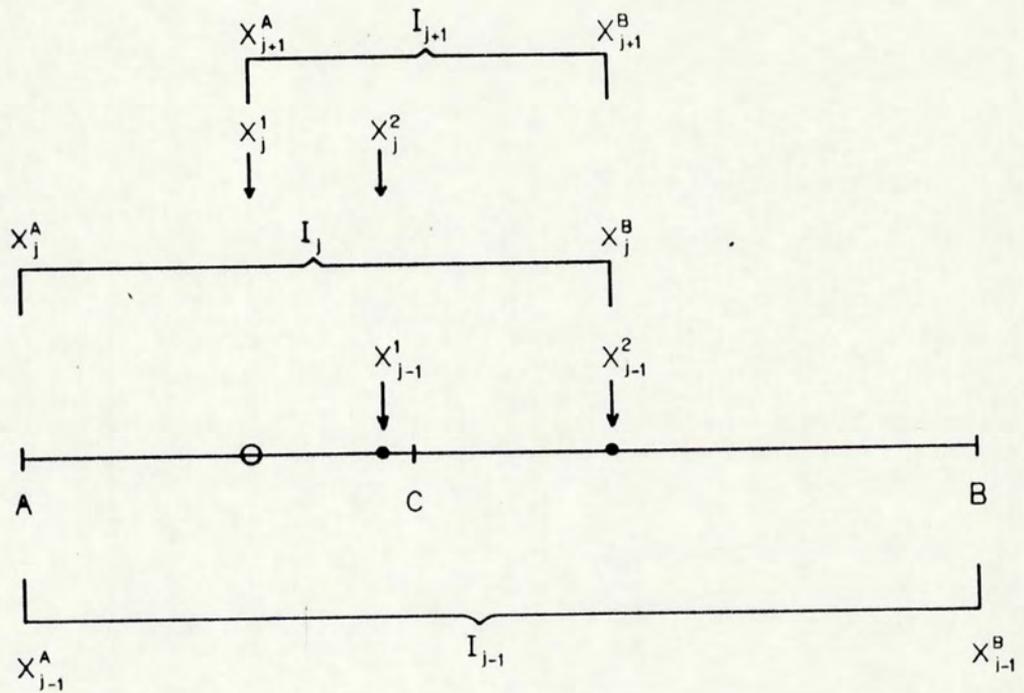


Fig. 1-4: Representação de uma seqüência de iterações do algoritmo "golden section".

$f(X_{j-1}) < f(X_{j-1}^*)$ , será  $[X_{j-1}, X_{j-1}^*]$ .

Para determinar os pontos em que deve ser calculada a função que desejamos otimizar, consideramos que existe um fator constante de redução do intervalo, independente do número da iteração. Chamemos de  $\tau$  este fator. Temos que:

$$I_j = \tau I_{j-1} \quad (1-39)$$

Além disso, tomemos que (Beightler 1979, sec. 4-08):

$$I_{j-1} = I_j + I_{j+1} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (1-40)$$

onde  $n$  é o número total de iterações.

Dividimos a última equação por  $I_{j-1}$  e, utilizando (1-39), obtemos:

$$\tau^2 + \tau = 1 \quad (1-41)$$

Cuja solução que nos interessa deve ser positiva e, portanto, igual a :

$$\tau = [(5)^{1/2} - 1] / 2 \approx 0.618 \quad (1-42)$$

Logo os valores da secção dos intervalos são iguais a:

$$X_{j-1} = X_{j-1} - (X_{j-1} - X_{j-1}^*)\tau \quad (1-43)$$

$$X_{j-1}^* = X_{j-1}^* + (X_{j-1} - X_{j-1}^*)\tau$$

Podemos notar que a condição 1-40 implica em que um dos pontos,  $X_{j-1}$  ou  $X_{j-1}^*$ , é reutilizado como um ponto de cálculo na iteração seguinte. Ou seja, é necessário calcular apenas um novo ponto a cada iteração. Isto é mostrado na figura 1-4, onde consideramos que o ponto C é o mínimo desconhecido. Vemos então que um dos pontos de cálculo utilizado na iteração de  $j-1$  para  $j$  é utilizado na iteração  $j$  para  $j+1$ .

Obviamente este método não garante que, caso existam vários valores ótimos, o melhor deles será encontrado. Ele apenas assegura, em um caso destes, que o intervalo encontrado possui um mínimo local. Portanto, sua utilização deve ser criteriosa, cabendo sempre uma escolha adequada de intervalo de busca. Fora esta desvantagem, este algoritmo é um dos mais eficazes e o que menos condições iniciais exigem, necessitando apenas definir o intervalo inicial de busca e um critério de precisão ou o número de iterações.

Com este método de otimização, a precisão relativa com que obtemos o valor ótimo é:

$$\delta\epsilon = \tau^n I_0 / 2 \quad (1-44)$$

onde  $n$  é o número de iterações e  $I_0$  é o intervalo inicial de busca.

Baseado neste método simples de determinação de valores máximos ou mínimos para uma função, construímos um algoritmo de otimização. Ele consiste em determinar, para cada camada, qual a espessura, dentro de um intervalo de variação das espessuras, que minimiza a função de mérito. Sua utilização principal é na reotimização de designs em tempo real, mas também pode ser útil na obtenção de um design em combinação com outro método.

Cabe salientar a importância da reotimização de filmes em tempo real. Quando estamos construindo certos filmes finos cujas características são muito específicas, pequenos erros podem comprometer totalmente os resultados. Em geral, nestes casos, o design é mais complicado do que o usual, necessitando de camadas diferentes de  $\lambda_0/4$ , o que aumenta mais as chances de erro. As fontes de erro podem ser: ruído no sistema de monitoração, tempo finito para atuação do shutter, falha humana, etc. A fim de não perder parte do trabalho realizado é interessante redesenhar o restante do filme de forma a compensar o erro ocorrido em alguma camada. A capacidade de compensação de erros de um algoritmo semelhante ao nosso foi demonstrada em (Holm 1979), através de simulação numérica.

### 1.2.3. Método do Gradiente

Ao contrário do método descrito na secção anterior, que trabalha com uma variável por vez, o método do gradiente é multivariável. A partir de um ponto de partida fornecido, calculamos o gradiente da função de mérito neste ponto. A forma de calcular a derivada da função de mérito em relação a espessura pode ser a partir da matriz característica (Baumeister 1962, Laan 1978), ou a partir de uma diferença finita. Apesar do primeiro método ser potencialmente mais preciso optamos pelo segundo por sua simplicidade. Temos que a componente  $i$  do gradiente é igual:

$$[\text{grad}(\text{FM})]_i \approx \frac{[\text{FM}(d_1, \dots, d_i + \delta d_i, \dots) - \text{FM}(d_1, \dots, d_i, \dots)]}{\delta d_i} \quad (1-45)$$

onde  $\delta d_i$  é uma pequena variação da espessura da camada  $i$ . Cada componente do gradiente assim calculado é dividida pela norma do gradiente de maneira a obtermos um vetor unitário.

Determinada uma direcção de melhor variação, apontada pelo gradiente, no espaço cujas dimensões são as espessuras das camadas, determinamos qual deve ser a variação nesta direcção. Para tanto, definimos um passo  $\mu$  a ser dado no sentido contrário ao apontado pelo gradiente, pois estamos interessados em minimizar a função de mérito. Calculamos a

função de mérito no ponto:

$$d = d_0 - \mu \text{grad}(FM) \quad (1-46)$$

onde  $d_0$  representa o vetor que aponta para o ponto de partida. Comparamos este valor da função de mérito com a do ponto de partida. Se ela for menor determinamos um novo ponto de cálculo dado por:

$$d = d_0 - 2\mu \text{grad}(FM) \quad (1-47)$$

Novamente comparamos o valor da função de mérito para este ponto com o valor para o ponto de partida. Se ainda for menor repetimos o processo aumentando em um o número de passos na equação 1-47. Assim fazemos até encontrarmos um valor de  $d$ , para o qual a função de mérito seja maior que a do ponto de partida. Representemos este ponto por:

$$d = d_0 - k\mu \text{grad}(FM) \quad (1-48)$$

com  $k$  igual a um inteiro. Determinamos através do método "golden section", da secção anterior, qual o valor que minimiza a função de mérito. O intervalo inicial de busca é dado por  $(k-2)\mu$  e  $k\mu$ . Se  $k=1$ , o mínimo deve ser procurado entre 0 e 1.

Determinado o valor da variação das espessuras, que

minimiza a função de mérito na direção do vetor gradiente, estamos prontos a determinar um novo ponto de partida. Para tanto, escolhemos, como módulo do vetor de variação na direção do gradiente, o valor do vetor que minimiza a função de mérito multiplicado por 0.9. Este procedimento se justifica pelo fato de, se a função pesquisada não gerar uma hiperesfera no espaço de suas variáveis, em geral, o vetor que aponta para o mínimo da função de mérito, apontará para um ponto além do ponto que gera uma convergência mais rápida (Simmons 1975, 137). O valor 0.9 é empírico e pode aumentar a velocidade de otimização em 100% ou mais. A partir deste novo ponto de partida, recomeçamos todo o processo, calculando um novo gradiente e assim por diante.

O método do gradiente produz um design diferente do produzido pelo método simples da secção anterior. Isto é importante, pois o uso combinado de dois métodos que geram designs diferentes pode ser útil em alguns problemas. Além disso, certos problemas podem ser mais facilmente abordados por um dos dois métodos. Obviamente o método do gradiente é, via de regra, mais efetivo e muito mais lento.

Como critério para determinação do final do processo de otimização pode-se utilizar a obtenção de um determinado valor da função de mérito e/ou a variação das camadas ser desprezível. Na próxima secção discutiremos esta questão entre outras.

### 1.3. Programa Para Cálculo e Otimização de Filmes Finos

O programa em anexo (veja apêndice A) calcula a refletividade do filme, bem como otimiza o desempenho do filme em relação a um comportamento esperado, pelos dois métodos descritos anteriormente. Os dados assim obtidos podem ser manipulados através de gráficos e tabelas, e armazenados em arquivos em disco. Além disso, o programa possui algumas facilidades de edição, tais como: mudar parte dos índices de refração, aumentar ou diminuir o número de camadas, alterar a espessura de uma ou mais camadas, etc, sem perder todos os dados. Os módulos de manipulação dos parâmetros de cálculo e resultados são autoexplicativos, apresentando sempre as opções existentes, o que facilita a utilização do programa.

Nos módulos de cálculo da refletividade e otimização do filme deu-se prioridade a velocidade. O algoritmo utilizado para calcular a refletividade é baseado na matriz característica e na equação 1-36a, deduzida na secção 1.1.4 (veja figura 1-5 com fluxograma). Note-se que no programa as admitâncias são calculadas sem o termo  $(\epsilon_0/\mu_0)^{1/2}$ . É possível demonstrar que todos os termos deste tipo simplificam-se, não influenciando no resultado final.

O programa leva em conta a dispersão do material de

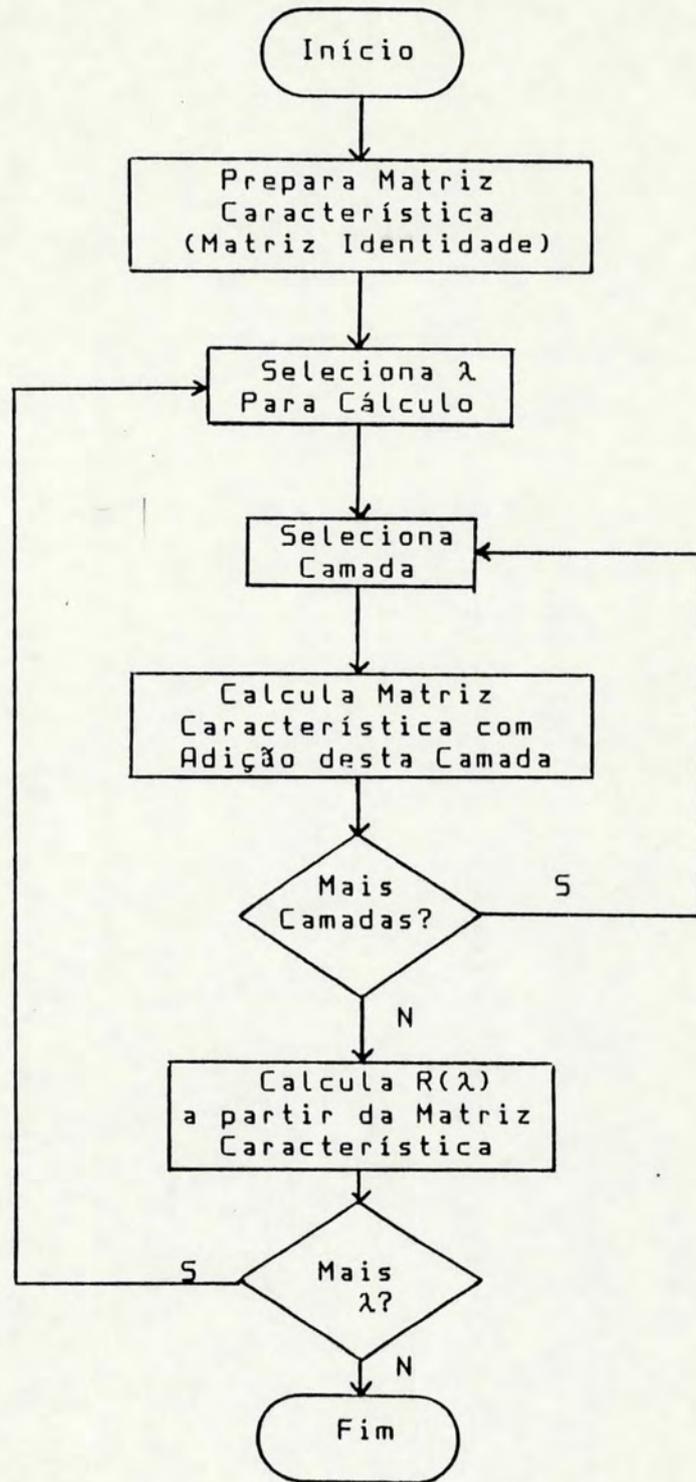


Fig. 1-5: Algoritmo para o cálculo do fator de reflexão.

que é constituída a camada, através da definição de até seis relações de dispersão diferentes. Para tanto, fornece-se os valores das constantes a e b de uma relação de Cauchy:

$$n = a + b/\lambda^2 \quad (1-49)$$

O programa calcula a partir desta relação o índice de refração de todas camadas e do substrato e meio, para cada comprimento de onda utilizado. Outras equações de dispersão (Smith 1966, 147) podem ser utilizadas com mínimas alterações do programa.

A otimização do desempenho do filme em relação a um comportamento ideal baseia-se na minimização da função de mérito definida na equação 1-38. Os parâmetros de minimização são as espessuras das camadas. Tanto a curva de refletividade desejada como a de tolerância são introduzidas pelo teclado e podem ser armazenadas em arquivos em disco. Pode-se escolher entre vários valores para o parâmetro k da equação 1-38.

No método simples de otimização podemos estabelecer os limites de variação das espessuras das camadas, a camada inicial e final a variar, a ordem em que devem ser otimizadas as camadas, bem como o número de iterações. A possibilidade de variar amplamente os fatores que influenciam na otimização do filme é importante para ajustar

o tempo de cálculo, para que se possa reotimizar o filme durante o intervalo entre a evaporação de um material e outro. Por isso, não se estabelece um critério de precisão para o término do programa e sim o número de iterações.

A otimização pelo método do gradiente está representada no algoritmo da figura 1-6. O comprimento do passo  $\mu$  para busca do módulo do vetor que minimiza a função de mérito, para a primeira iteração, é fornecido ao programa. Para as iterações seguintes o programa utiliza o módulo do vetor que minimizou a função de mérito dividido por dois. O valor da variação da espessura  $\delta d_i$ , utilizado para calcular o gradiente, é, a cada iteração, determinado a partir do comprimento do passo dividido por um fator que é definido pelo operador. Assim garantimos que esta variação não se torne maior que as variações ao longo das camadas, o que comprometeria a aproximação da derivada utilizada.

Como critério para término do processo de otimização estabelecemos que, quando os módulos das variações de espessura tornam-se menores que um valor estipulado, então a otimização termina. Ao mesmo tempo, o programa durante o processo de otimização, antes de iniciar uma nova iteração, testa se alguma tecla foi pressionada. Se isso aconteceu, a otimização termina, mantendo os valores das camadas obtidos até aquela altura do processo. Esta característica, junto com outra, que permite opcionalmente uma saída na impressora

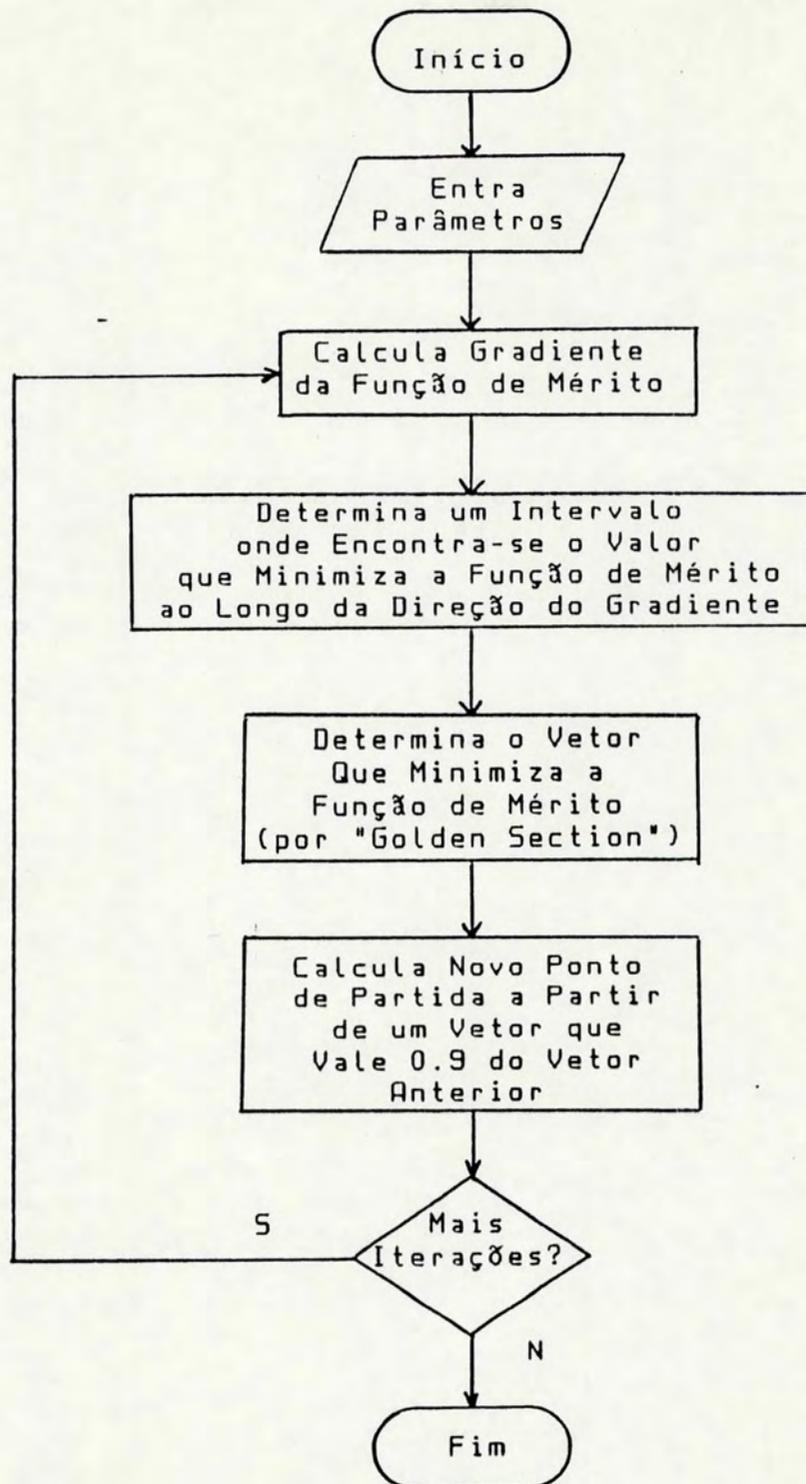


Fig. 1-6: Algoritmo para otimização pelo método do gradiente.

dos valores da função de mérito, módulo do vetor de busca e máxima variação de espessura, possibilita que acompanhemos o processo de otimização e o sistemas, se percebemos que chegamos a um impasse. Podemos tentar um novo ponto de partida, ou quem sabe, utilizar o método simples de otimização sobre o design até aqui obtido, para gerar um novo design de partida.

A linguagem utilizada foi Pascal, por permitir uma programação modular estruturada, o que facilita futuros desenvolvimentos e permite uma maior portabilidade do programa fonte. A versão de Pascal utilizada foi uma variante do Standart Pascal, próxima do UCSD Pascal. A precisão dos cálculos varia com o computador utilizado.

O programa foi testado em microcomputadores da linha MSX e compatíveis com microcomputadores IBM. Através do exemplo abaixo, podemos dar uma idéia da velocidade de cálculo: para obter um espectro de  $R(\lambda) \times \lambda$ , para um filme de 10 camadas, com a refletividade calculada em 200 pontos sobre o intervalo de comprimento de onda especificado, são necessários menos de 4,5 minutos em um computador da linha MSX. A título de comparação, basta dizer que um programa anterior, similar a este, desenvolvido por nós em linguagem BASIC toma 7 vezes mais tempo, nesta mesma tarefa e neste mesmo computador.

Para otimizar, pelo método simples, uma camada de um design de 10 camadas, calculando a refletividade em 50 pontos sobre o intervalo de comprimentos de onda de interesse e realizando 6 iterações para minimizar a função de mérito, necessitamos de 12,5 minutos em um microcomputador da linha MSX. Com um microcomputador compatível com um IBM-XT, sem o coprocessador matemático 8087, o programa rodou com uma velocidade cerca de três vezes maior que na linha MSX. Já num computador com coprocessador matemático 8087, também compatível com um IBM-XT, o mesmo cálculo de um design de 10 camadas, que leva 4,5 minutos em um MSX, levou apenas 12 segundos! O que torna possível a reotimização em tempo real de filmes com um grande número de camadas. O tempo gasto para otimizar um filme pelo método do gradiente é da ordem de algumas horas em um computador IBM-XT sem coprocessador matemático, variando grandemente com o problema proposto.

## 2. OBTENÇÃO E MONITORAÇÃO DE FILMES FINOS

Neste capítulo faremos uma rápida análise dos métodos de obtenção de filmes finos, com ênfase na aplicação em ótica. Em particular estudaremos o método de evaporação térmica em alto vácuo. Após nos determos na monitoração de espessura de filmes finos, desenvolvendo a teoria necessária para a utilização da monitoração ótica.

## SUMARIO

- 2.1. Métodos de Obtenção de Filmes Finos
  - 2.1.1. Métodos Químicos
    - 2.1.1.1. Ataque Químico
    - 2.1.1.2. Deposição de Filmes a Partir de Soluções
    - 2.1.1.3. Deposição Química a Partir de Vapor
    - 2.1.1.4. Deposição Eletrolítica
  - 2.1.2. Métodos Físicos
    - 2.1.2.1. "Cathode Sputtering"
    - 2.1.2.2. Bombardeio por íons
    - 2.1.2.3. Evaporação Térmica em Alto Vácuo
    - 2.1.2.4. "Ion Plating"
- 2.2. Evaporação Térmica em Alto Vácuo
  - 2.2.1. Princípio do Método
  - 2.2.2. Teoria Cinética Aplicada a Sistemas de Vácuo
  - 2.2.3. Fluxo de Gases
  - 2.2.4. Parâmetros Experimentais
    - 2.2.4.1. Taxas de Evaporação
    - 2.2.4.2. Uniformidade do Filme Evaporado
    - 2.2.4.3. Temperatura e Condições do Substrato
    - 2.2.4.4. Condições Ambientais
- 2.3. Monitoração ótica da Espessura de Filmes Dielétricos
  - 2.3.1. Introdução
  - 2.3.2. Princípio do Método

### 2.1. Métodos de Obtenção de Filmes Finos

Existem muitos métodos de obtenção de filmes finos, no entanto apenas alguns são de interesse geral, não se limitando a algumas poucas aplicações específicas. Aqui faremos um rápido apanhado desses métodos com vistas à aplicações em ótica. Nos restringiremos, basicamente, ao princípio de cada método e ao possível controle da espessura das camadas. Estudaremos com maior profundidade o método de evaporação térmica em alto vácuo, por sua importância fundamental na pesquisa e produção de filmes finos.

A escolha de um determinado método vai depender do material que se deseja depositar, do tipo e tamanho do substrato, da qualidade desejada para o filme, do custo, etc.

Podemos dividir os métodos de obtenção de filmes finos em dois grandes grupos não muito rígidos: métodos que utilizam processos químicos e métodos que utilizam processos físicos na formação do filme.

#### 2.1.1. Métodos Químicos

Por métodos químicos entendemos processos em que o material a ser depositado é formado a partir de uma reação química. Em geral, esta reação acontece junto à superfície do substrato e produz um produto que possui uma fase sólida que fica aderida à superfície.

##### 2.1.1.1. Ataque Químico

Este foi o primeiro método de obtenção de camadas anti-reflexivas. Descoberto acidentalmente por Fraunhofer em 1817 ao limpar lentes embaçadas com uma solução de ácido concentrado (sulfúrico ou clorídrico) (Fraunhofer 1888).

Mais tarde, foi utilizado na limpeza de objetivas de telescópios e aperfeiçoado de modo a produzir a camada anti-reflexiva sem a necessidade de esperar pelo embaçamento (Taylor 1904).

O princípio do método é a formação de uma camada homogênea de cerca de 0.5 nm, de alta aderência, com índice de refração menor que o do vidro.

Este método não é muito utilizado atualmente, devido à baixa eficiência da camada antireflexiva e à necessidade de banhos diferentes para cada tipo de vidro. Além disso, não há controle da espessura da camada.

#### 2.1.1.2. Deposição de Filmes a Partir de Soluções

Este método foi muito utilizado na fabricação de espelhos de prata e, ainda hoje, é utilizado para espelhar grandes áreas em que a qualidade do depósito não é crítica, a um preço baixo. Em 1835 já eram conhecidos métodos de depositar prata por processos químicos que tiveram grande importância no desenvolvimento de espelhos astronômicos de boa qualidade. Com o desenvolvimento dos espelhos de alumínio evaporado, esta técnica foi gradualmente abandonada para aplicações científicas.

Outros metais também são possíveis de serem depositados a partir de soluções, tais como Ni, Co, Pd, Pt, Cu, Au, e algumas ligas destes metais, além de materiais como óxidos e compostos orgânicos.

Este método não possibilita um controle preciso da espessura, o que torna difícil sua utilização na obtenção de camadas interferenciais com determinadas características, ou mesmo de espelhos metálicos semitransparentes.

#### 2.1.1.3 Deposição Química a Partir de Vapor

Neste método os reagentes encontram-se no estado de vapor e, ao reagirem, produzem o material de que deseja-se o filme, o qual condensa-se sobre o substrato. Existe um grande número de métodos de ativar a reação, tais como ativação com luz, radiofrequência, bombardeamento com elétrons, ativação catalítica pela superfície do substrato, ativação por laser, etc. O processo pode se dar em diferentes condições experimentais, tais como pressão atmosférica ou baixa pressão, alta ou baixa temperatura, etc.

Este método tem sido aplicado principalmente na obtenção de filmes para utilização em circuitos eletrônicos e semicondutores. O método foi utilizado na produção de

filmes óticos na forma de filmes antireflexivos multicamadas durante a 2ª guerra mundial. Foi posteriormente substituído por outros métodos e só recentemente voltou a ser utilizado para recobrimentos óticos (Pulker 1984, 121). O controle da espessura e da uniformidade do filme é difícil (Feist 1969, 240).

Um exemplo interessante de deposição química a partir de vapor ativada por laser é a deposição de cádmio em um substrato de InP para fazer contatos ôhmicos (Deutsch 1980). Para este propósito, utiliza-se a luz de um laser de ArF (193 nm), transmitida através de um furo de 0,1 mm, que decompõe o composto  $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ . Por meio desta técnica o Cádmio é depositado seletivamente apenas na região iluminada pelo laser. Ao mesmo tempo, o material é difundido para o interior do substrato pelo aquecimento da região promovido pelo laser.

Uma variação desta técnica permite remover contatos indesejáveis (Ehrlich 1980) em máscaras de circuitos integrados ou outros. A região que se deseja remover é iluminada com luz ultravioleta numa atmosfera de  $\text{Cl}_2$ . O laser gera cloro no estado atômico na região que incide, o qual, devido a sua alta reatividade, ataca o metal, permitindo sua posterior remoção.

#### 2.1.1.4. Deposição Eletrolítica

Este método consiste na deposição de uma substância (em geral um metal), contido em uma solução (eletrólito), sobre um substrato condutor, pela aplicação de uma diferença de potencial entre o substrato e uma outra placa condutora e da consequente passagem de uma corrente elétrica pela solução.

É utilizado no recobrimento de metais ou outras superfícies em que seja possível depositar previamente uma camada condutora. A finalidade é proteger o substrato contra a corrosão e/ou abrasão com um produto mais nobre. Também é utilizado no recobrimento de artefatos para fins decorativos.

Existe um grande número de variáveis envolvidas de difícil controle (por exemplo, concentrações de reagentes na solução, densidades de corrente, etc) que influenciam no resultado de uma maneira desconhecida e imprevisível. Além disso, a pureza do depósito não é boa, pois a deposição se dá em um meio aquoso, contendo muitos compostos que são adsorvidos pelo depósito. O controle preciso da espessura também é difícil, sendo feito através da densidade de corrente e do tempo de deposição.

## 2.1.2. Métodos Físicos

Nestes métodos o filme é obtido a partir de um processo físico: ou pela subtração de parte do substrato, ou pela adição de material. A adição de material acontece a partir de uma fase gasosa, com o material condensando-se sobre o substrato. Em alguns processos, o material reage quimicamente com a atmosfera ou é decomposto parcialmente antes de ser depositado.

### 2.1.2.1. "Cathode Sputtering"

Numa descarga luminescente ("glow"), em um gás a baixa pressão, nota-se que o material de que é constituído o cátodo é expelido ("sputtered"), devido ao forte bombardeamento a que é submetido pelos íons positivos da descarga. Este fenômeno é o princípio deste método de construção de filmes, com o material expelido sendo depositado no substrato que deseja-se recobrir. Ele é o mais antigo método de obtenção de filmes finos em vácuo. Após um relativo desuso, nas últimas décadas vem chamando a atenção (Maissel 1966), tanto que, junto com a evaporação térmica em alto vácuo, constituiu-se num dos métodos de obtenção de filmes finos mais universais disponíveis atualmente (Ritter 1981). O mecanismo, pelo qual o material é ejetado, é complexo e não existe uma teoria completa sobre o assunto

(Thomas 1979, 550).

A monitoração de espessura dos filmes, neste método, pode ser realizada da mesma forma que para a evaporação térmica em alto vácuo. Discutiremos a monitoração de espessura mais adiante, ainda neste capítulo.

Em relação à evaporação térmica em alto vácuo, podemos salientar vantagens e desvantagens (Thomas 1979, sec. 16.4). As vantagens são: a boa uniformidade do depósito, mesmo para grandes áreas de formato complexo; a facilidade de depositar qualquer tipo de material; e a grande reprodutibilidade do sistema, devido à estabilidade dos parâmetros experimentais.

As desvantagens do método são: a baixa taxa de deposição, muito menor do que as obtidas com a evaporação térmica; a dificuldade de variar os parâmetros experimentais para obter filmes com diferentes propriedades; e, por fim, a obtenção de filmes com grandes quantidades de gases inclusos, o que causa tensões no filme.

#### 2.1.2.2. Bombardeio por íons

Este método consiste no bombardeio da superfície do substrato com partículas de alta energia aceleradas por

diferenças de potencial da ordem de dezenas de kV. O bombardeio de substratos de vidro, em uma descarga luminescente ("glow") em gás nobre, com uma voltagem de 50 kV, produz uma camada antireflexiva sobre o substrato. O método é semelhante ao "cathode sputtering", com a diferença que o próprio cátodo é o substrato.

O princípio do método consiste na subtração seletiva de material do substrato pelo choque das partículas ionizadas, além da mudança da estrutura do material remanescente. Com a mudança da concentração relativa e da estrutura dos constituintes, ocorre uma alteração no índice de refração na superfície. Esta variação se dá na direção normal à superfície. Como a camada é formada a partir do próprio material de que é constituído o substrato, ela possui uma alta aderência. Também neste método não existe um controle preciso sobre a espessura da camada.

#### 2.1.2.3. Evaporação Térmica em Alto Vácuo

Este método será tratado com profundidade na secção 2.2. Ele consta aqui para salientar sua posição entre os métodos físicos de obtenção de filmes finos. De certa forma, ele antecede o próximo método que utiliza princípios dele e do método "cathode sputtering".

#### 2.1.2.4. "Ion Plating"

Esta técnica é uma combinação da evaporação térmica em alto vácuo com "cathode sputtering". Como na evaporação térmica, o material a ser evaporado é aquecido através de uma resistência ou de um feixe de elétrons. No entanto, a evaporação acontece na presença de uma descarga elétrica como no "cathode sputtering". Uma primeira vantagem que podemos esperar deste método, em relação ao "cathode sputtering", é um aumento da taxa de deposição. Em relação à evaporação térmica, a vantagem é que as moléculas incidentes no substrato possuirão, em média, mais energia, o que favorece a aderência do filme ao substrato. Outra vantagem é uma maior uniformidade do filme, devido ao espalhamento das moléculas evaporadas pelo gás da descarga (Pulker 1984, 250).

Originalmente este método foi utilizado no recobrimento de metais e ligas com filmes que mudassem as características da superfície destes, tais como a dureza e resistência à abrasão, para aplicações tribológicas em ferramentas mecânicas. Apenas recentemente esta técnica passou a ser utilizada para outros materiais, tais como filmes multicamadas de dielétricos (Pulker 1984, 353). Este método apresenta grandes potencialidades.

A monitoração de espessura pode ser realizada como

nos métodos "cathode sputtering" e evaporação térmica em alto vácuo.

## 2.2. Evaporação Térmica em Alto Vácuo

Nos deteremos mais demoradamente neste que, junto com o "Cathode Sputtering", é o principal método de obtenção de filmes finos e o que utilizamos em nosso trabalho. Começamos com o princípio do método, partindo, em seguida, para uma revisão da teoria cinética dos gases aplicada a sistemas de vácuo e para uma revisão das equações de fluxo de gases. Depois analisamos os parâmetros experimentais que influenciam na evaporação.

### 2.2.1. Princípio do Método

Quando um material tem sua temperatura aumentada, de forma que a sua fase sólida ou líquida esteja em equilíbrio com a fase de vapor, ele evapora. Se a evaporação acontece a uma pressão suficientemente baixa, as moléculas ou átomos evaporados podem percorrer uma grande extensão, indo se condensar nas superfícies frias em que colidirem. Este é o princípio básico da evaporação térmica em alto vácuo. Colocamos o material, a partir do qual queremos construir um filme, em uma fonte para ser aquecido e colocamos um

substrato a uma certa distância da fonte, onde se condensará o material evaporado. Todo o processo é realizado em um compartimento a baixa pressão.

Os materiais dos quais podem-se obter filmes com este método cobrem praticamente todos os materiais sólidos que não sejam decompostos pelo aquecimento ou pela baixa pressão. Outros materiais podem ser obtidos a partir de uma evaporação reativa, em que o material sendo evaporado é decomposto ou reage quimicamente com o gás residual. A reação pode ser ativada por algum processo, como aquecimento ou radiação eletromagnética (Pulker 1984, 169).

Existem basicamente duas formas de aquecimento do material para evaporação: aquecimento resistivo e feixe de elétrons. No primeiro, o material é colocado em uma fonte que pode ser de um metal, de cerâmica, de carbono ou de algum outro material refratário. O aquecimento se dá ou através da passagem de uma corrente pela fonte, ou através de um filamento em contato com a fonte ou com o material. As correntes utilizadas são da ordem de algumas dezenas a algumas centenas de ampéres a uma tensão baixa. Os mais variados tipos de fontes de evaporação, suas formas de utilização, materiais de que devem ser construídas e para que tipos de evaporando servem, são discutidos em (Holland 1958, chap. 4). O aquecimento resistivo é a forma de aquecimento utilizada em nosso trabalho.

No segundo método, o do feixe de elétrons, utiliza-se um canhão de elétrons para produzir o feixe, sendo este focalizado em uma porção do material, que está em um cadinho. Normalmente não existe nenhuma interação entre o material e o cadinho, pois o cadinho é resfriado pela passagem de água. Apenas a porção do material em que incide o feixe de elétrons funde e evapora. A vantagem decorrente é que os filmes obtidos são mais puros do que aqueles obtidos por aquecimento resistivo, onde é muito comum a contaminação do depósito com material oriundo da fonte de evaporação. Além disso este método serve para evaporar materiais refratários que dificilmente podem ser evaporados por aquecimento resistivo, tais como molibdênio e carbono. As desvantagens deste método são seu alto custo, complexidade de operação e de controle da taxa de evaporação.

### 2.2.2. Teoria Cinética Aplicada a Sistemas de Vácuo

A teoria cinética dos gases é certamente uma das mais poderosas ferramentas teóricas para tratar sistemas de vácuo. Ela se presta tanto para descrição de sistemas em equilíbrio como para sistemas fora do equilíbrio. O estudo de ambos é necessário para a perfeita compreensão dos sistemas de vácuo, os quais são fundamentais neste processo de obtenção de filmes finos.

Consideremos uma molécula de massa  $m$ . A energia desta molécula pode ser escrita como:

$$E = K + E_{int} + U_{ext} \quad (2-1)$$

onde  $K$  representa a energia cinética da molécula,  $U_{int}$  a sua energia interna (de rotação e/ou vibração), e  $U_{ext}$  a energia de interação entre ela e outras moléculas. Desconsideremos a energia potencial de interação com as outras moléculas e a energia interna (o que é razoável, pois vamos considerar gases suficientemente diluídos e a temperaturas ambientes ou mais elevadas). Então:

$$E_i = mv_i^2/2 \quad (2-2)$$

onde  $i$  está denotando a molécula  $i$  de um conjunto de moléculas e  $v_i$  sua velocidade.

Consideremos que o nosso sistema de vácuo está em contato permanente com um reservatório de calor (o meio ambiente). Logo nosso sistema constitui-se em um ensemble canônico e podemos utilizar o formalismo da função partição da mecânica estatística na descrição das propriedades do sistema. Temos:

$$E = \sum \eta E_i = \sum \eta (mv_i^2/2) \quad (2-3)$$

e:

$$Z = \sum_r \exp(-E_r/kT) = \int \exp\{-[m/2(\sum_i v_{i,2})^2]/kT\} dpdr/v_c \quad (2-4)$$

onde Z é a função partição, cuja soma deve se estender sobre todos estados possíveis do espaço de fases,  $v_c$  é o volume de cada célula no espaço de fases e k a constante de Boltzmann. Resolvendo esta integral obtemos:

$$Z = V^N (2\pi mkT)^{3N/2} / v_c^{3N} \quad (2-5)$$

Sabemos da Mecânica Estatística que (Reif 1965):

$$p = kT (\ln Z)_{l_v} \quad (2-6)$$

onde  $l_v$  representa a derivada parcial em relação a V. Então:

$$p = NkT/V \quad (2-7)$$

Esta é uma das equações de estado para um gás ideal.

Determinemos agora a função que fornece a distribuição das velocidades das moléculas que compõe o gás. Para isso consideremos a probabilidade de encontrar uma molécula no espaço de fase em um elemento de volume

$drdv$ , centrado na posição  $(r, v)$ :

$$P(r, v)drdv = C \exp[-(mv^2/2)/kT]drdv \quad (2-8)$$

a qual, multiplicada pelo número total de moléculas, fornece o número de moléculas neste volume do espaço de fases. Ou seja, o número de moléculas entre  $r$  e  $r+dr$  e com velocidade entre  $v$  e  $v+dv$ . Chamemos esta função de  $f(r, v)$  e escrevamo-la como segue:

$$f(r, v)drdv = C' \exp[-(mv^2/2)/kT]drdv \quad (2-9)$$

Com a seguinte condição de normalização:

$$\int f(r, v)drdv = N \quad (2-10)$$

onde  $N$  é o número total de moléculas do sistema e a integração se estende sobre todo o espaço de fases. Da condição de normalização obtemos o valor para a constante  $C'$  e podemos escrever a função de distribuição de velocidades como:

$$\begin{aligned} f(r, v)drdv &= f(v)drdv = \\ &= n(m/2\pi kT)^{3/2} \exp(-mv^2/2kT)drdv \end{aligned} \quad (2-11)$$

Esta é a distribuição de Maxwell para velocidades.

Para se obter uma outra distribuição de velocidades muito útil, a distribuição de Maxwell para o módulo da velocidade, consideramos um volume de uma casca esférica no espaço das velocidades, que é igual a  $4\pi v^2 dv$ . Ele contém todas as moléculas com velocidade entre  $v$  e  $v+dv$ , independente da direção e sentido destas velocidades. Como a distribuição de Maxwell para velocidades leva em conta apenas o módulo da velocidade, basta multiplicá-la pelo volume da casca esférica para obtermos o número de moléculas neste volume. Assim temos:

$$F(v)dv = 4\pi n(m/2\pi kT)^{3/2} v^2 \exp(-mv^2/kT)dv \quad (2-12)$$

A partir desta distribuição podemos determinar a velocidade média das moléculas:

$$v_{méd} = \int_0^\infty v F(v) dv / n \quad (2-13)$$

logo:

$$v_{méd} = (8kT/\pi m)^{1/2} \quad (2-14)$$

Para o caso do ar, supomos que as moléculas possuem uma massa de  $4,811 \times 10^{-26}$  kg (Pipko 1984, apêndice 1), e obtemos que sua velocidade média é igual 462,7 m/s à temperatura de 20°C.

Vamos calcular agora o número de colisões contra uma

parede por unidade de área e unidade de tempo. Consideramos um pequeno elemento de área  $dA$  e todas as moléculas na sua vizinhança, com velocidade entre  $v$  e  $v+dv$ , que possam se chocar contra a parede dentro de um intervalo de tempo  $dt$ . Como estamos considerando o vetor velocidade, isto define uma direção que forma um ângulo  $\theta$  com a normal. Desta forma, podemos pensar em um cilindro de área  $dA$ , altura  $vdt\cos\theta$  e que forma um ângulo  $\theta$  com a normal do elemento de superfície  $dA$  (figura 2-1). O número total  $N_T$  de moléculas neste cilindro é:

$$N_T = (vdt\cos\theta)dAf(v)dv \quad (2-15)$$

E o número  $N_C$  de moléculas neste cilindro que colidem com a parede por unidade de área é igual a:

$$N_C = v\cos\theta f(v)dv \quad (2-16)$$

Agora, integrando sobre todas as direções possíveis de acontecer um choque com a parede (ou seja, para ângulos  $\theta$  entre  $\pi$  e  $2\pi$ ) e sobre todos os valores de velocidade, obtemos o número de colisões por unidade de área e por unidade de tempo, que denotamos por  $\bar{\xi}_0$ :

$$\bar{\xi}_0 = \frac{1}{4}n\bar{v}_{msd} \quad (2-17)$$

A partir deste resultado podemos estimar o tempo  $T_m$

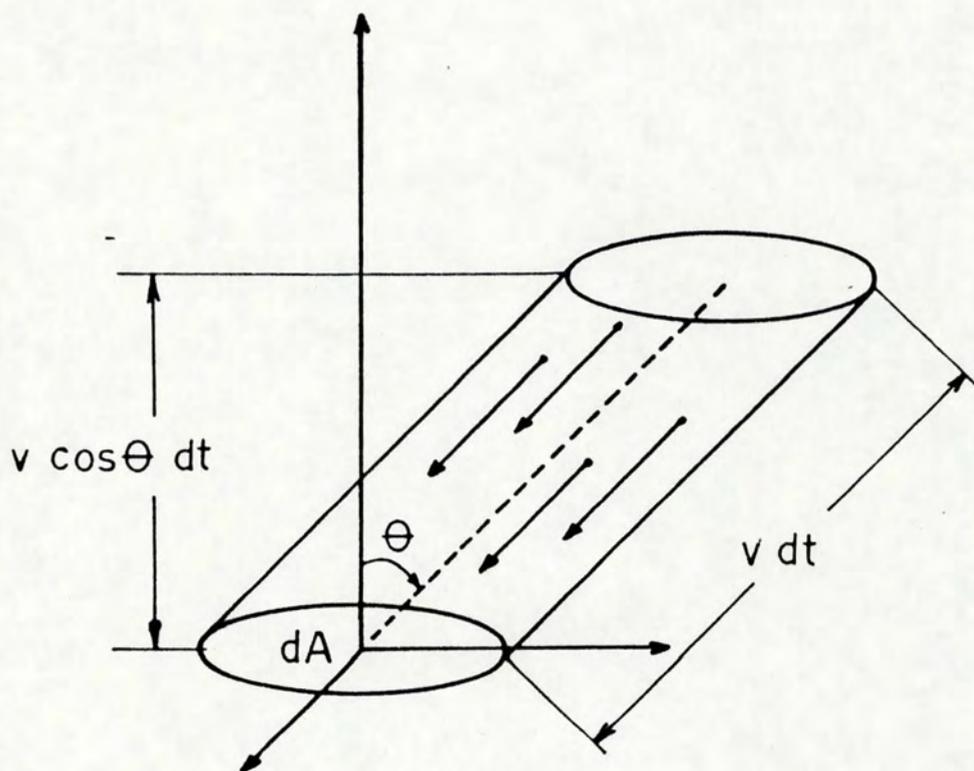


Fig. 2-1: Cilindro contendo as moléculas com velocidade entre  $v$  e  $v+dv$  que chocam-se com  $dA$ .

necessário para formar uma monocamada de gás sobre uma superfície. Consideramos que cada molécula ocupa uma área de  $\pi(\sigma/2)^2$ , onde  $\sigma$  é seu diâmetro aparente, e obtemos que:

$$T_m = [\pi(\sigma/2)^2 \bar{z}_0]^{-1} \quad (2-18)$$

Calculemos agora o tempo médio  $\tau$  entre duas colisões sucessivas de uma molécula com outras, que chamaremos de período entre colisões. Para tanto faremos algumas simplificações que não comprometerão muito o resultado.

Consideremos uma molécula de diâmetro  $\sigma$ , movimentando-se a velocidade  $v_{med}$  e todas as outras moléculas fixas em suas posições, também com diâmetros iguais a  $\sigma$ . Desde que duas moléculas não ocupam o mesmo lugar no espaço, a distância mínima entre duas moléculas é igual a  $\sigma$ . Portanto, a nossa molécula, ao se deslocar varre um volume efetivo igual ao de um cilindro com secção reta igual  $\pi\sigma^2$  e altura  $vdt$  (figura 2-2). Toda vez que acontecer uma colisão a molécula mudará apenas de direção, já que consideramos as outras moléculas fixas. O volume do cilindro não será muito alterado, se o diâmetro da molécula for pequeno comparado com a distância percorrida entre dois choques. Então, como a frequência de choques é igual ao inverso do tempo entre colisões, temos que este vale:

$$\tau = (n\pi\sigma^2 v_{med})^{-1}$$

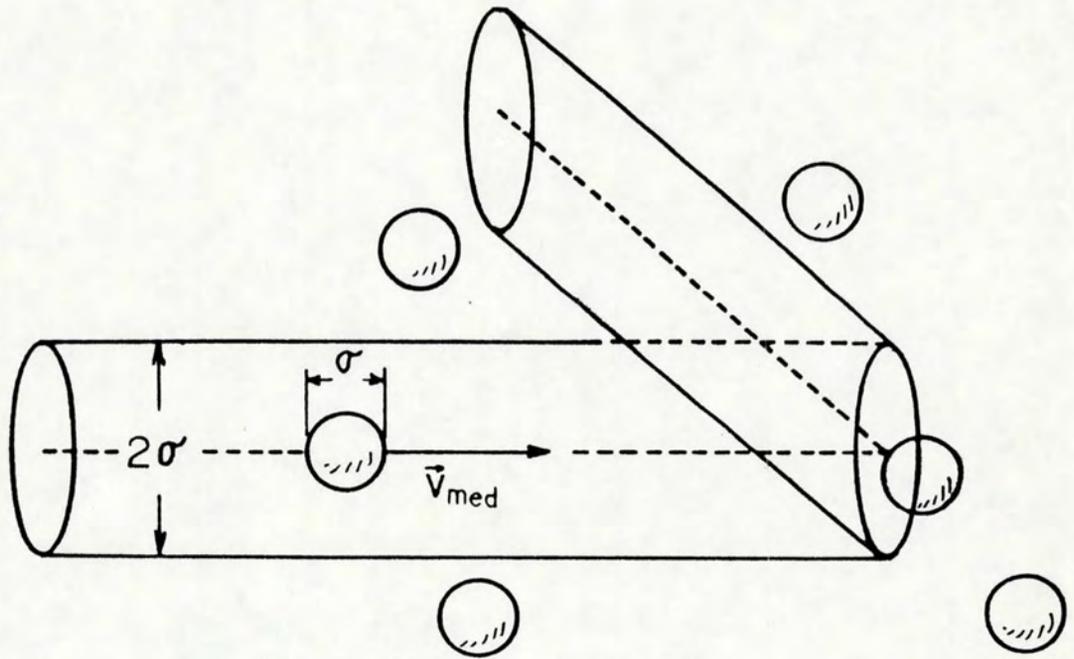


Fig. 2-2: Volume varrido por uma molécula ao se deslocar.

Obviamente o pressuposto de que todas as outras moléculas estão fixas é muito artificial. Uma forma de levar em conta o movimento das outras moléculas é, na equação 2-18, tomarmos não a velocidade média das moléculas, mas sim a velocidade média relativa entre as moléculas. Para estimarmos o valor da velocidade média relativa entre duas moléculas 1 e 2 de uma forma simples, escrevemos:

$$v_r = v_1 + v_2 \quad (2-19)$$

Tomamos a média quadrática e aproximamos:

$$[(v_r)_{med}]^2 \approx [(v_r)^2]_{med} \quad (2-20)$$

Assim obtemos:

$$(v_r)_{med} \approx [(v_{1med})^2 + (v_{2med})^2]^{1/2} \quad (2-21)$$

Se consideramos todas as moléculas do mesmo tipo, então as duas velocidades do lado direito da equação são iguais. Logo:

$$\tau = [(2)^{1/2} n \pi \sigma^2 v_{med}]^{-1} \quad (2-22)$$

Definimos, a partir do período entre colisões, o caminho livre médio  $r$  como a distância média percorrida por

uma molécula entre duas colisões e expressamo-lo como:

$$r = v_{m.e.d} \tau = [(2)^{1/2} \pi \sigma^2]^{-1} \quad (2-23)$$

Uma última observação sobre este resultado é de que a expressão  $\pi \sigma^2$ , por suas dimensões e pela forma como foi derivada representa, na verdade, a secção de choque eficaz do gás considerado.

### 2.2.3. Fluxo de Gases

Resumiremos aqui as principais definições e fórmulas relacionadas ao fluxo de gases. Nas fórmulas para as condutâncias nos restringiremos a tubos de secção circular e de orifícios. As fórmulas para outros formatos de tubos podem ser encontradas em (Dushman 1949, chap. 2). Exemplos simples da dedução destas fórmulas podem ser encontrados em (Lewin 1965, chap. 2).

A velocidade de bombeio ou taxa de fluxo volumétrico  $S$  de um gás através de um orifício ou tubo é definido como a taxa temporal de volume que passa através deste orifício ou tubo. A velocidade de bombeio multiplicada pela pressão do gás no ponto considerado é proporcional ao fluxo de matéria. Esta grandeza constitui o que denominamos de fluxo  $Q$ .

A condutância de uma abertura ou de um tubo é definida como a razão entre o fluxo e a pressão no tubo ou orifício. Observe que a condutância possui a mesma dimensão que a velocidade de bombeio.

Agora devemos estabelecer a distinção entre os vários tipos de fluxo existentes. Para pressões em que o livre caminho médio das moléculas de um gás é 100 vezes menor que as dimensões do ambiente, temos o denominada fluxo viscoso. Nesta região de fluxo, o comportamento do gás é altamente dependente da interação entre as moléculas que o constituem, e são válidos os princípios da dinâmica de fluidos. Nesta região o fluxo pode ser laminar ou turbulento. Acima de uma certa velocidade de bombeio, o gás não pode ser considerado como um conjunto de secções laminares movendo-se umas em relação a outras, base para o modelo de fluxo laminar. Este tipo de fluxo é denominado turbulento e não será aqui considerado, pois é improvável que ocorra em um sistema de vácuo por mais do que alguns instantes (Dushman 1949, 89).

Quando o livre caminho médio torna-se igual ou maior que as dimensões do ambiente em que se encontra o gás, temos a região de fluxo molecular. Nesta região as colisões entre as moléculas perdem sua importância, sendo as colisões com as paredes muito mais prováveis de acontecer. O fluxo torna-se apenas um processo estatístico.

Entre estes dois tipos de fluxo existe uma região em que o livre caminho médio é da ordem das dimensões do ambiente até 100 vezes menor que estas, denominada de região de transição. Nesta região tanto a influência das paredes como da interação entre as moléculas é importante, sendo difícil sua descrição exata. As fórmulas válidas para o fluxo molecular podem ser utilizadas, pois sobrestimam os valores da condutância para esta região (Moore 1983, 75).

Independentemente do tipo de fluxo valem as seguintes equações, análogas as equações para soma de resistências em circuitos elétricos, para a soma de condutâncias em série ou paralelo, respectivamente:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots \quad (2-24)$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (2-25)$$

Para obter a velocidade líquida  $S$  de um sistema, a partir da sua velocidade de bombeio  $S_b$ , primeiro determina-se sua condutância equivalente com o auxílio das equações 2-24 e 2-25 e, em seguida, utiliza-se a seguinte equação:

$$1/S = 1/S_b + 1/C_{eq} \quad (2-26)$$

A condutância para um orifício de área  $A$ , em regime

de fluxo molecular, é dada por:

$$C = v_{méd} A / 4 \quad (2-27)$$

E para fluxo viscoso:

$$C \approx 20A / [1 - P_2 / P_1] \quad (2-28)$$

onde  $P_1$  e  $P_2$  são as pressões em cada lado da abertura. A área da abertura é fornecida em  $\text{cm}^2$  e a condutância em  $\text{l/s}$ .

A condutância de um tubo de diâmetro  $D$  e comprimento  $L$  é dada para fluxo molecular por:

$$C = 12D^4 / L \quad (2-29)$$

e para fluxo viscoso por:

$$C(\text{l/s}) = 180D^4 P_{méd} / L \quad (2-30)$$

onde as medidas espaciais são dadas em  $\text{cm}$  e  $P_{méd}$  é a pressão média dada em torr. Estas equações são válidas para a temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Um último resultado interessante da teoria de fluxo de gases é o que fornece o tempo necessário para evacuar um

volume  $V$ , de uma pressão  $P_0$  até uma pressão  $P$ , supondo uma velocidade de bombeio  $S$  constante e que não existam fontes no sistema (Moore 1983, 75):

$$T_{\text{b}} = 2.3 \frac{V}{S} \ln \frac{P_0}{P} \quad (2-31)$$

#### 2.2.4. Parâmetros Experimentais

Discutiremos nesta secção os principais parâmetros que influenciam nas características dos filmes obtidos por evaporação térmica em alto vácuo. Além dos parâmetros, aqui discutidos, existem outros, tais como a pureza do material a ser depositado, material de que é constituída a fonte, etc, de menor importância. Mesmo não sabendo exatamente como os parâmetros experimentais influenciam nos resultados obtidos e, muitas vezes, não sendo possível estabelecer uma forma precisa de controlá-los, é fundamental mantê-los constantes, a fim de que as características obtidas sejam reproduzíveis.

##### 2.2.4.1. Taxa de Evaporação

Inicialmente, discutiremos a dependência da taxa de evaporação com a pressão de vapor do material sendo evaporado e a temperatura da fonte de evaporação. Em seguida, falaremos da importância da taxa de evaporação na

qualidade e nas propriedades dos filmes construídos.

A pressão para a qual a fase de vapor de um material está em equilíbrio com a fase líquida ou sólida, para uma dada temperatura  $T$ , é dita pressão de vapor. Para pressões menores que 1 torr, temos (Dushman 1949, 742):

$$\ln P_v = A - B/T \quad (2-32)$$

onde  $P_v$  representa a pressão de vapor,  $A$  e  $B$  são constantes determinadas a partir de dados experimentais e  $T$  é a temperatura dada em K. Curvas de pressão de vapor para um grande número de materiais podem ser encontradas em (O'Hanlon 1980).

Para determinar a taxa de evaporação de uma fonte, consideremos uma superfície plana de área  $A$  exatamente sobre a fonte de evaporação. Quando a temperatura da fonte for tal que a pressão de vapor do material é igual a pressão no interior da campânula, o número de átomos que passam por esta superfície imaginária, por unidade de tempo, é igual a  $\frac{1}{4} n v_{rms} A$ . Utilizando as expressões para a velocidade média (2-13) e a equação de estado (2-7) deduzidas anteriormente, podemos escrever o número de átomos que deixam a fonte por unidade de tempo como:

$$N' = A p_v [2\pi M m_u m_m kT]^{-1/2} \quad (2-33)$$

Onde a linha em N representa a derivada temporal, T é a temperatura da fonte dada em K, M o peso molecular do material e  $m_{u.m.}$  a unidade de massa atômica.

Multiplicando ambos os lados da equação 2-33 por  $Mm_{u.m.}$  obtemos a massa total evaporada por unidade de tempo que representamos por  $m'$ :

$$m' = \alpha A p_v [M m_{u.m.} / 2\pi k T]^{1/2} \approx 5,833 \times 10^{-2} \alpha p_v [M/T]^{1/2} \quad (2-34)$$

Na constante está incluída uma área de evaporação de  $1 \text{ cm}^2$  e  $p_v$  deve ser dado em torr, T em K e M é adimensional. Introduzimos na expressão 2-34 o fator  $\alpha$  que representa um coeficiente de condensação das moléculas sobre as superfícies em que incidem. Este coeficiente depende do material sendo evaporado e do substrato (temperatura, composição, etc). Por exemplo, para o alumínio este coeficiente é aproximadamente 1, o que implica que os átomos de alumínio não são espalhados pelas paredes. Já os materiais dielétricos tem um coeficiente menor que 1 e geram muitas moléculas espalhadas.

A taxa de evaporação está diretamente ligada à estrutura do filme e à quantidade de gás que é incorporado nele. Desta forma ela influencia na aderência do filme ao substrato e nas tensões do filme (Ennos 1966), bem como no

índice de refração do filme (Ritter 1981, 23). Os dois primeiros fatores determinam a estabilidade mecânica do filme.

Nos dois materiais que utilizamos em nosso trabalho, a tensão no filme de ZnS parece ser independente da taxa de evaporação, enquanto no filme de  $MgF_2$  a tensão aumenta para taxas de evaporação menores (Ennos 1966, 54). A parte real do índice de refração é independente da taxa de evaporação para os dois materiais que utilizamos (Hall 1955, 75). No entanto, para o ZnS, taxas muito elevadas tendem a aumentar a absorção de luz pelo filme, enquanto taxas muito baixas produzem filmes pouco resistentes, sendo a taxa adequada da ordem de 30nm/min (Holland 1958, 295).

#### 2.2.4.2. Uniformidade do Filme Evaporado

Junto com o índice de refração, a espessura é o parâmetro que determina as propriedades óticas de um filme, conforme vimos na secção 1.1. A espessura de um filme depende da posição do substrato em relação à fonte de evaporação e pode variar para diferentes posições em um mesmo substrato, conforme seu tamanho. A forma de controlar a espessura do filme sendo depositado será discutida em detalhe na secção 2.3. Aqui trataremos da uniformidade da espessura do filme depositado.

Discutiremos a distribuição espacial do material evaporado para dois tipos de fontes: puntiformes e de superfície direcionada. Considerações sobre outros formatos de fontes podem ser encontradas em (Holland 1952).

Por fonte puntiforme entendemos uma fonte de formato esférico, cuja dimensão é desprezível se comparada à sua distância ao ponto em que queremos determinar a quantidade de material oriundo dela. Como exemplo de uma fonte real, que possui um comportamento que se aproxima desta fonte idealizada, podemos citar as fontes de filamento em formato de cesta, utilizadas para evaporar grânulos de material.

Como fonte de superfície direcionada entendemos uma pequena superfície plana emissora de material, e, como único pressuposto, assumimos que a pressão é suficientemente baixa para que as moléculas evaporadas não interfiram entre si. Assim, suas trajetórias podem ser consideradas como raios que ligam a fonte ao ponto em que queremos determinar a quantidade de material evaporado. Neste caso podemos fazer uso de uma lei análoga à lei de Lambert para radiação, conhecida, no estudo de gases, como lei de Knudsen (Present 1958, 56).

Esta lei pode ser deduzida de forma semelhante à que

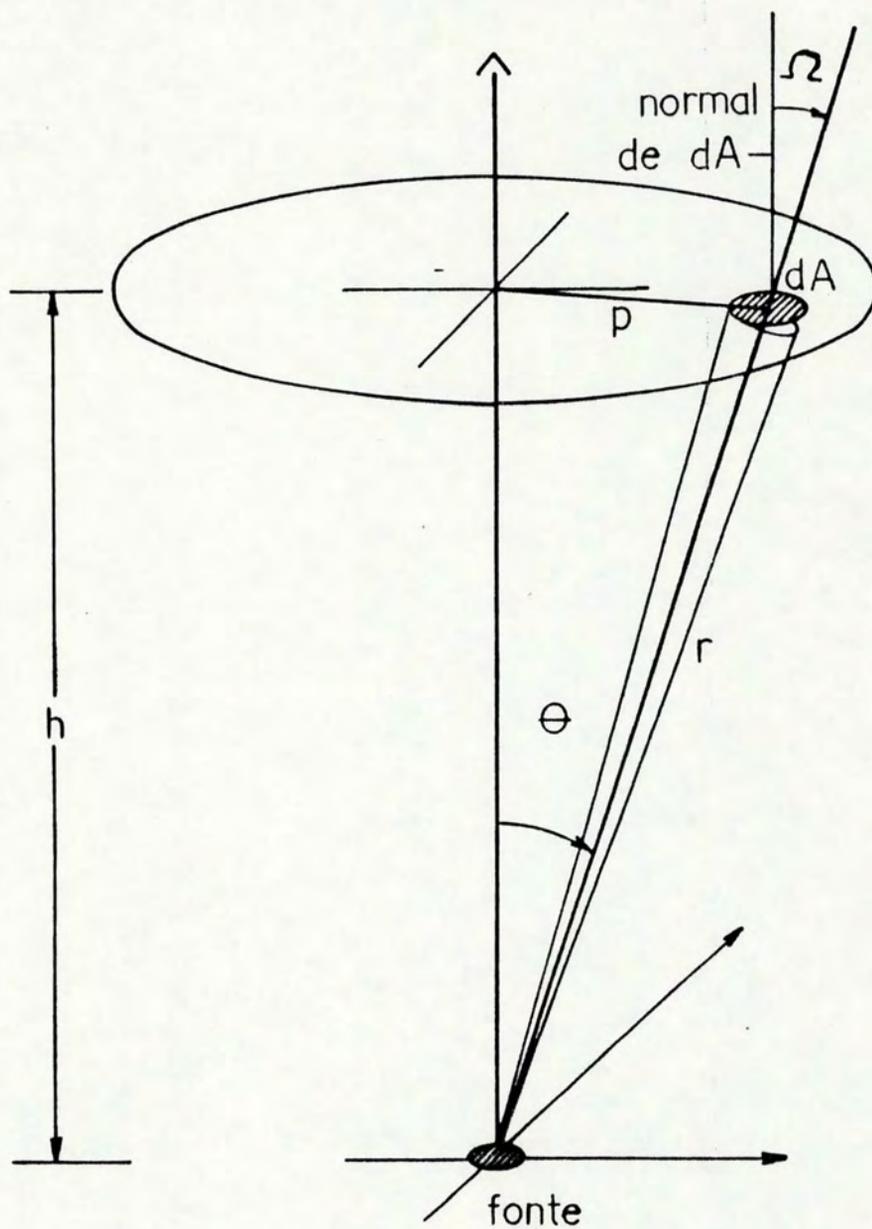


Fig. 2-3: Um elemento emissor de material com área  $dA$ .

utilizamos para deduzir o número de partículas que se chocam contra a parede por unidade de tempo e unidade de área, na secção 2.2.2. A diferença é que não extendemos a integração em todas direções, mas apenas integramos na variável velocidade. Assim obtemos que o número de moléculas que são emitidas por nossa pequena superfície plana é igual a:

$$dN = n v_{\text{m.m.}} \cos \theta dw / 4\pi \quad (2-35)$$

onde  $dw$  é um elemento de ângulo sólido na direção  $\theta$ .

Começemos nossas considerações sobre a distribuição do material evaporado pela fonte de superfície orientada. Na lei de Knudsen expressa na equação 2-17,  $n v_{\text{m.m.}} / 4$  nada mais é do que a taxa de evaporação  $m'$ , dividida pela massa de uma molécula. A massa de uma molécula, por sua vez, pode ser expressa como  $M m_{\text{u.m.}}$ , onde  $M$  é a massa molecular da molécula e  $m_{\text{u.m.}}$  é a unidade de massa atômica. Então a massa  $dm'$ , evaporada no ângulo sólido  $dw$ , que forma um ângulo  $\theta$  com a normal a superfície da fonte, por unidade de tempo, é dada por:

$$dm' = M m_{\text{u.m.}} dN = m' \cos \theta dw / \pi \quad (2-36)$$

Consideremos o elemento de superfície  $dA$ , cuja normal forma um ângulo  $\Omega$  com a linha que une este elemento a fonte (veja figura 2-3). Expressamos o ângulo sólido  $dw$  em função

do elemento de área  $dA$  e reescrevemos a equação 2-25 como:

$$dm' = m' \cos\theta \cos\Omega \frac{dA}{\pi r^2} \quad (2-37)$$

Como estamos interessados na espessura do filme depositado no elemento de área  $dA$ , expressamos  $dm'$  como:

$$dm' = m_{\bullet} t' dA \quad (2-38)$$

onde  $m_{\bullet}$  é a massa específica do material depositado e  $t'$  é a variação da espessura por unidade de tempo, no elemento de área  $dA$ . Obtemos a seguinte equação:

$$t' = \frac{m'}{m_{\bullet} \pi} \frac{\cos\theta \cos\Omega}{r^2} \quad (2-39)$$

A partir desta equação podemos determinar a distribuição de material pela fonte sobre a superfície plana representada na figura 2-3. Assim obtemos:

$$t' = \frac{m'}{m_{\bullet} \pi} \frac{h^2}{(p^2 + h^2)^2} \quad (2-40)$$

onde  $p$  e  $h$  são os segmentos representados na figura 2-3. Chamemos de  $t'_0$  a derivada da espessura exatamente acima da fonte. Da equação anterior obtemos que a espessura relativa é igual a:

$$\frac{t'}{t'_0} = \frac{1}{(1 + p^2/h^2)^2} \quad (2-41)$$

No caso da fonte puntiforme, pela simetria do problema, não existe a dependência da quantidade de material  $dm'$  distribuída no ângulo sólido  $d\omega$ , com o ângulo  $\theta$ , presente na equação 2-25 para a fonte de superfície orientada. Para obtermos  $dm'$ , neste caso, basta dividir a quantidade total de material  $m'$  pelo ângulo total no qual é distribuído o material, no caso  $4\pi$ . Logo, para a fonte puntiforme, temos:

$$dm' = m' \cos\theta d\omega / 4\pi \quad (2-42)$$

As mesmas considerações para determinar a espessura do material evaporado, para a fonte de superfície orientada, permanecem válidas para o caso da fonte puntiforme, com a única diferença mencionada acima. Obtemos a seguinte equação para a distribuição do material evaporado no caso da fonte puntiforme:

$$\frac{t'}{t'_0} = \frac{1}{(1+p^2/h^2)^{3/2}} \quad (2-43)$$

Na figura 2-4 temos um gráfico de  $t'/t'_0$  em função de  $p/h$ , para as duas fontes consideradas.

Vemos no gráfico, que a área em que o filme tem uma espessura uniforme é extremamente pequena. Para uma altura

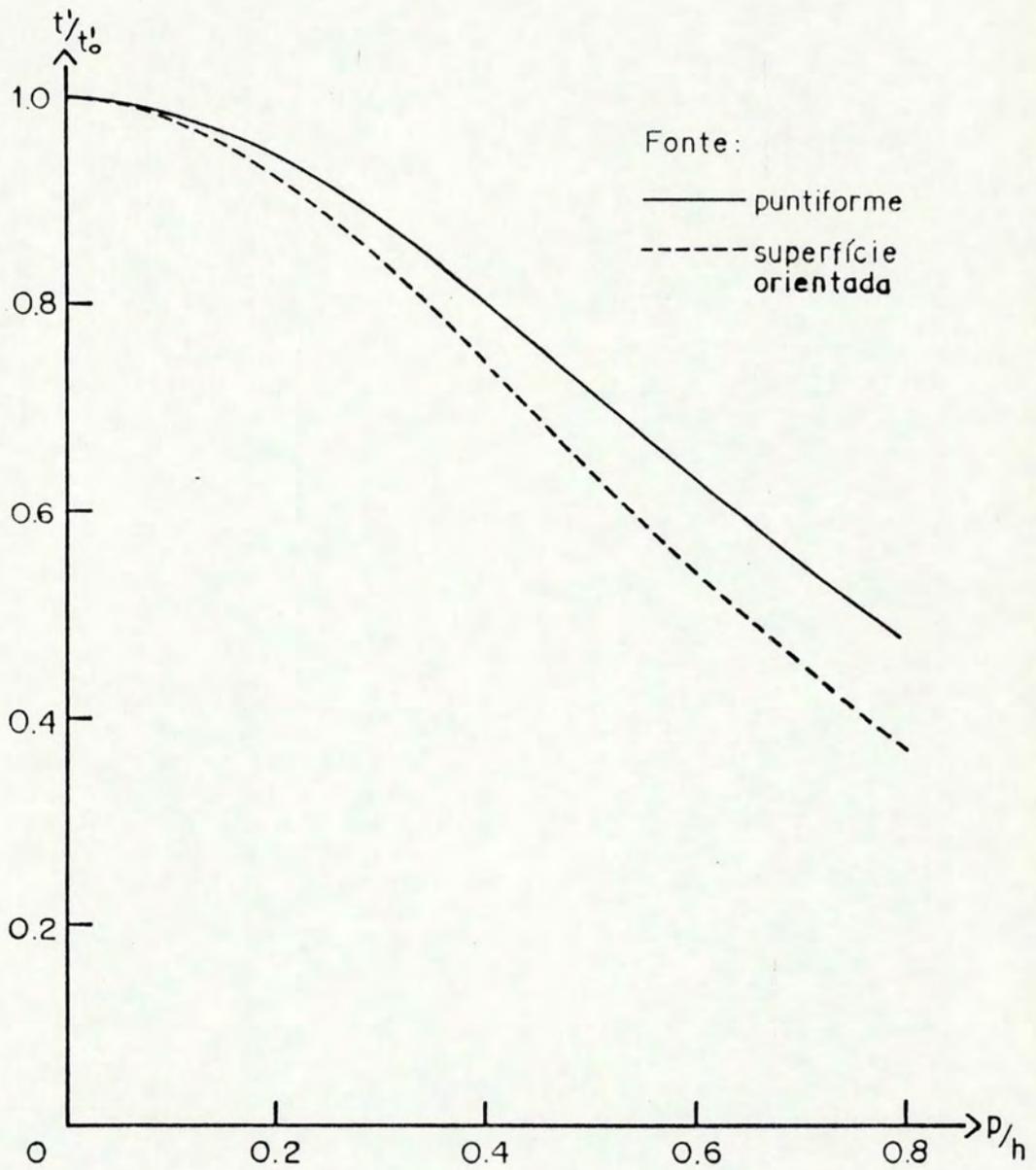


Fig. 2-4: Gráfico da espessura relativa em relação a  $p/h$ .

de, por exemplo, 45 cm, a dimensão máxima para o substrato é de 5 cm, a fim de que a variação na espessura, entre o centro e a borda do substrato, seja de 0,6%. Uma forma de melhorar a região de uniformidade é utilizar um porta substrato na forma de um calota esférica, ou ainda, para termos uma grande uniformidade, um porta substratos giratório (Macleod 1969, cap. 9).

#### 2.2.4.3. Temperatura e Condições do Substrato

As condições e a temperatura do substrato influenciam na qualidade do filme obtido e no seu índice de refração. Como condições do substrato entendemos as propriedades físicas e químicas da superfície e o estado de limpeza desta. A limpeza do substrato é o fator mais importante na obtenção de uma boa adesão do filme ao substrato (Stuart 1983, 88). Partículas de sujeira na superfície do substrato geram pequenos furos no recobrimento. Na secção 3.3.2 descrevemos o procedimento de limpeza por nós utilizado.

A temperatura do substrato está diretamente relacionada com o índice de refração de filmes de muitos materiais e com a aderência ao substrato. Isto se deve ao fato de a temperatura influenciar a estrutura com que cristaliza o filme, o tamanho dos cristais formados, bem como sua interação com o material de que é constituído o

substrato. Em geral, o aumento da temperatura gera um aumento no tamanho dos cristais e na aderência ao substrato (Thomas 1979, 524).

Um exemplo clássico, da grande influência da temperatura do substrato no índice de refração do filme obtido, é dado pelos filmes de  $\text{CeO}_2$  (Hass 1958, 325). Para este material um aumento da temperatura do substrato de  $50^\circ\text{C}$  para  $350^\circ\text{C}$  gera uma variação do índice de refração do filme depositado de 2,28 para 2,53 a 450nm. No entanto, outros fatores, tais como taxa de evaporação e pressão, pouco influenciam no índice de refração do referido material.

#### 2.2.4.4. Condições Ambientais

A composição e a pressão do gás residual, presente no ambiente em que se processa a evaporação, influenciam na estrutura e composição da camada. Juntamente com a taxa de evaporação, a pressão total no ambiente de evaporação determina a quantidade de gás incluso no filme. A composição do gás influencia na espécie química que é depositada. Assim, se evaporarmos lentamente alumínio a uma pressão relativamente alta, em uma atmosfera com muito oxigênio, o filme formado terá baixa refletividade, principalmente no ultravioleta, devido ao óxido de alumínio que forma-se junto

com a camada de alumínio.

Contudo é possível tirar vantagens da interação do evaporante com o gás residual. Por exemplo, ao depositarmos SiO pode ser interessante que esta deposição aconteça a uma pressão parcial de oxigênio de  $8 \times 10^{-5}$  torr, acima da encontrada normalmente no ambiente de evaporação (Bradford 1963). Ao evaporar, o SiO reage quimicamente com oxigênio, de maneira que a proporção entre átomos de Si e O, encontrados no depósito, é de 1 para 1,5. Os filmes assim depositados, ao contrário do filme puro de SiO, não apresentam absorção no visível e no ultravioleta próximo, sendo muito úteis na proteção de outros revestimentos, tais como o de alumínio.

### 2.3. Monitoração ótica de Espessura de Filmes Dielétricos

Inicialmente, na introdução, fazemos um rápido apanhado dos principais pontos relacionados com monitoração de espessura e na secção seguinte discorreremos sobre a teoria da monitoração ótica de espessura.

#### 2.3.1. Introdução

Existem muitos métodos para medir a espessura de filmes finos. Em (Behrndt 1966) encontramos uma revisão dos

principais métodos para medir espessura, distribuição do material evaporado e taxas de evaporação. Em (Pulker 1984, 288) encontramos uma tabela em que são sumarizados cerca de 20 métodos para medir espessura e taxa de evaporação. No entanto, como é salientado em (MacLeod 1981) e em (Pulker 1984, cap. 7), apesar de existirem tantas técnicas, apenas poucas se prestam para a monitoração da espessura de filmes finos. Entre os métodos adequados cabe destacar os métodos que utilizam cristal de quartzo e os ditos métodos óticos.

Os métodos com cristal de quartzo estão baseados na variação da frequência de oscilação de um cristal de quartzo com a adição de material. O sinal é, em primeira aproximação, diretamente proporcional à quantidade de massa aderida ao cristal e independe das propriedades físicas do material (Lu 1975, 578).

As vantagens deste método de monitoração estão ligadas à facilidade de processamento do sinal obtido. Devido à linearidade, basta derivar o sinal para obtermos a taxa de deposição de material. Outras possibilidades associadas com este método são a completa automação do sistema, com término automático de camadas, e a capacidade de monitorar camadas para aplicações desde o ultravioleta até o infravermelho mesmo com materiais fortemente absorventes (Pulker 1978, 44). Uma desvantagem na construção de filmes óticos está na necessidade de calibrar o

equipamento para cada material e para cada condição experimental, pois a relação entre a massa e as espessuras óticas não são sempre as mesmas.

Os métodos óticos são baseados nas propriedades interferenciais dos filmes e determinam a espessura ótica a partir da medida do fator de transmissão e/ou de reflexão do filme que está sendo depositado. A escolha de qual fator é o mais adequado depende do tipo de design considerado. Por exemplo, para camadas metálicas não transparentes é mais interessante monitorar a transmissão, pois fica bem determinado o ponto de término da camada, já que o sinal se anula.

A monitoração da espessura tanto pode ser feita no próprio substrato em que se constrói o filme, como em um substrato separado. A primeira alternativa apresenta algumas vantagens para certos designs constituídos de uma sequência de camadas de  $\frac{1}{4}$  de um comprimento de onda, tais como filtros de banda estreita. Foi demonstrada a existência de um mecanismo de compensação de erros neste caso (Macleod 1977). Além disso, a informação sobre as espessuras é direta, evitando erros que possam advir de condensações diferentes no substrato de monitoração e no substrato do filme sendo construído.

A vantagem de se utilizar um outro substrato para

monitorar a espessura é de ser possível utilizar comprimentos de onda de referência de que não dispomos forma de obter, como veremos na próxima secção. Além disso, certos designs são difíceis de serem monitorados pelo método direto. Eventualmente, a variação do sinal pode tornar-se da ordem do ruído do sistema, já que estamos medindo o conjunto de camadas depositadas. No método indireto, este problema é resolvido utilizando-se outra região do substrato de monitoração ou outro substrato de monitoração. Por fim, com o método indireto é possível monitorar camadas com espessuras que não sejam múltiplas de  $\frac{1}{4}$  de um comprimento de onda de referência.

### 2.3.2. Princípio do Método

A luz refletida por um filme fino dielétrico, depositado em um substrato, está formada por vários feixes, devido às múltiplas reflexões entre as superfícies. Ao variar a espessura  $d_1$  do filme estes feixes interferem, produzindo uma série de valores extremos de intensidade. O primeiro extremo aparece quando a espessura ótica  $n_1 d_1$  vale  $\lambda_0/4$ . Nesta situação os feixes refletidos e transmitidos pelas faces do filme tem uma diferença de fase de  $\pi$  ou  $2\pi$ , dependendo dos índices de refração do substrato, do meio e do filme.

Consideremos um substrato com índice de refração  $n_0$ , sobre o qual é depositado um filme dielétrico com índice de refração  $n_1$  e espessura  $d_1$ , uniforme e isotrópico (ver fig. 1-1). A luz incide de um meio com índice de refração  $n_0$  em um ângulo  $\theta_0$ . É possível chegar à seguinte equação para a refletividade (Heavens 1955, sec 4.4), onde os parâmetros  $r_1$  e  $r_2$  são, respectivamente, os coeficientes de Fresnel das interfaces 1 e 2 da figura 1, e  $k_1 \delta_1 = 2\pi n_1 d_1 \cos \theta_1 / \lambda$ :

$$R = \frac{[(r_1)^2 + 2r_1 r_2 \cos 2k_1 \delta_1 + (r_2)^2]}{[1 + 2r_1 r_2 \cos 2k_1 \delta_1 + (r_1 r_2)^2]} \quad (2-44)$$

A parte realmente importante desta equação é seu numerador, já que o denominador pode ser aproximado por 1. Esta equação é válida para filmes não absorventes e nela observamos, além dos termos  $(r_1)^2$  e  $(r_2)^2$  que fornecem a amplitude da luz refletida pelas interfaces 1 e 2 isoladamente, um termo de interferência entre as amplitudes refletidas pelas interfaces 1 e 2, dado por  $2r_1 r_2 \cos 2k_1 \delta_1$ . Este termo é que originará o comportamento oscilatório da refletividade em função da espessura ótica  $n_1 d_1$ . Nele  $r_1 r_2$  fornecem o valor da amplitude de variação da refletividade sobre o "background"  $(r_1)^2 + (r_2)^2$ , dependendo esta amplitude apenas das características óticas dos materiais. E  $2k_1 \delta_1$  fornece o período de oscilação, que depende dos índices de refração da camada e do meio, da espessura  $d_1$  e do comprimento de onda

da radiação incidente.

A figura 2-5 mostra a dependência do coeficiente de reflexão para o caso de incidência normal ( $\theta_0=0$ ), em função da espessura ótica  $n_1 d_1$  do filme. Supomos que o substrato é vidro ( $n_2=1,52$ ), o meio incidente é o vácuo ( $n_0=1$ ). Notamos que existem máximos (ou mínimos) para  $n_1 d_1 = \lambda_0/4, \lambda_0/2, \text{ etc,}$  para  $n_1 < n_2$  ( $n_1 > n_2$ ). Por outro lado, quando  $n_1 d_1 = \lambda_0/2, \lambda_0, \text{ etc,}$  a intensidade da luz volta a seu valor inicial. Como vemos, é muito fácil a obtenção de camadas de  $\lambda_0/4$  ou múltiplos destes valores sem qualquer calibração prévia.

Os índices de refração, utilizados para traçar as curvas de refletividade em função da espessura ótica da figura 2-5, foram 1,39 e 2,35. Estes valores correspondem aproximadamente ao  $\text{MgF}_2$  e ao  $\text{ZnS}$ , dois dos materiais mais largamente utilizados em filmes finos dielétricos. Vemos que a refletividade varia de 4,52% para 1,43%, para o primeiro material, e para 32,30% para o segundo. Ou seja, uma variação de cerca de 3 vezes e 7 vezes, respectivamente.

Ao monitorarmos a espessura de um filme por um método ótico, medimos a espessura apenas em uma pequena região do substrato. Como vimos na secção 2.2.4.2, nas vizinhanças desta região a espessura varia. Este fato deve ser considerado ao dispormos os substratos no evaporador.

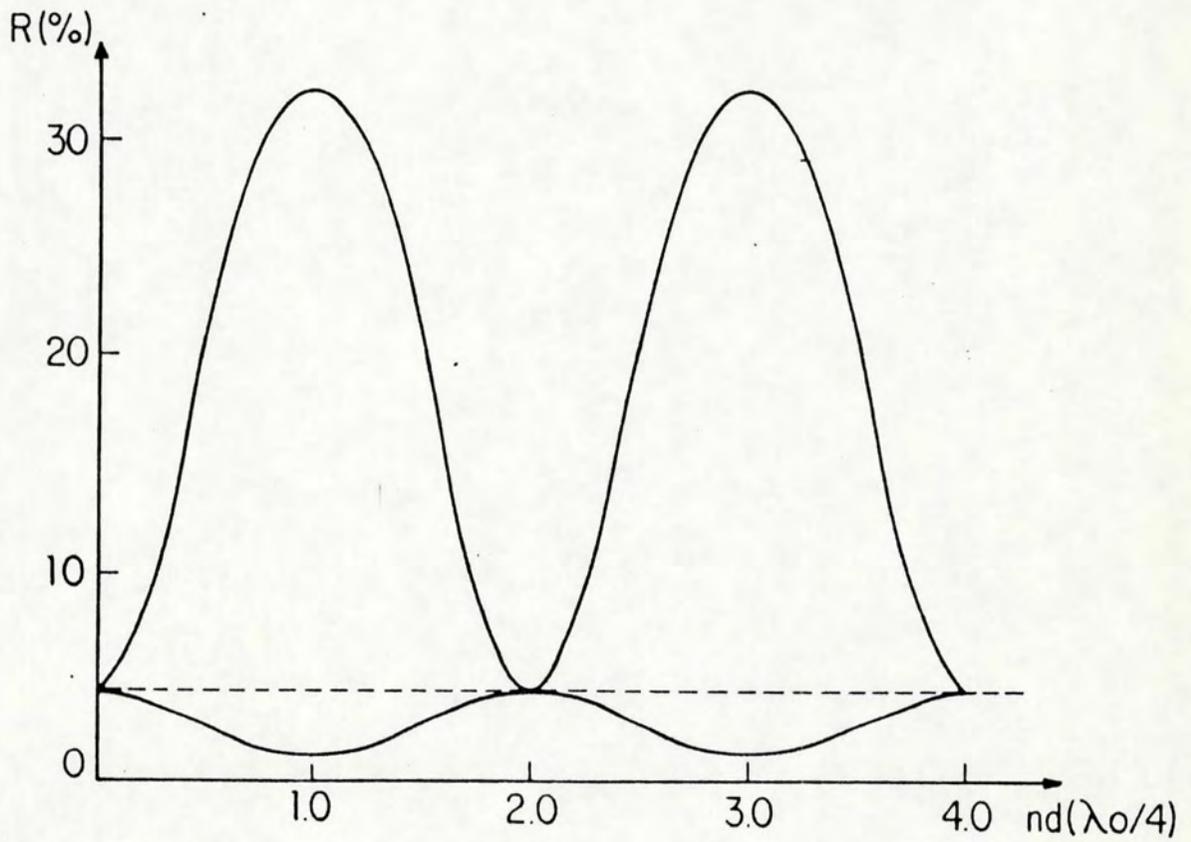


Fig. 2-5: Variação do fator de reflexão com a espessura ótica do filme.

Contudo, também podemos tirar proveito desta variação para obter-mos camadas cuja espessura ótica corresponda a  $\lambda_0/4$  para um comprimento de onda diferente do usado na monitoração. Chamemos o comprimento de onda de monitoração de  $\lambda_m$  e ao outro comprimento de onda de  $\lambda_n$ . A espessura depositada em um substrato, colocado à distância  $r$  da fonte, dependerá desta distância e do ângulo que a normal da superfície do substrato forma com a linha que o une à fonte. Se a espessura depositada no substrato de monitoração, colocado a uma distância  $r_m$  da fonte de evaporação, é igual a  $\lambda_m/4$ , então a espessura depositada em um outro substrato, colocado a uma distância  $r_n$ , pode ser escrita como  $\lambda_n/4$  (veja figura 2-6), e existe a seguinte relação entre as espessuras, considerando as fontes como de superfícies orientadas:

$$\frac{1}{4}\lambda_m r_m^2 / \cos^2 \theta_m = \frac{1}{4}\lambda_n r_n^2 / \cos^2 \theta_n \quad (2-45)$$

De onde tiramos :

$$t_m = (r_n^2 \cos^2 \theta_n / r_m^2 \cos^2 \theta_m) t_n \equiv F t_n \quad (2-46)$$

onde  $t_m$  e  $t_n$  são as espessuras físicas das camadas depositadas no substrato do filme sendo construído e no substrato de monitoração, respectivamente. Definimos  $F$  como um fator de configuração (Laan 1986). Podemos relacionar o comprimento de onda de referência  $\lambda_n$  do filme com o

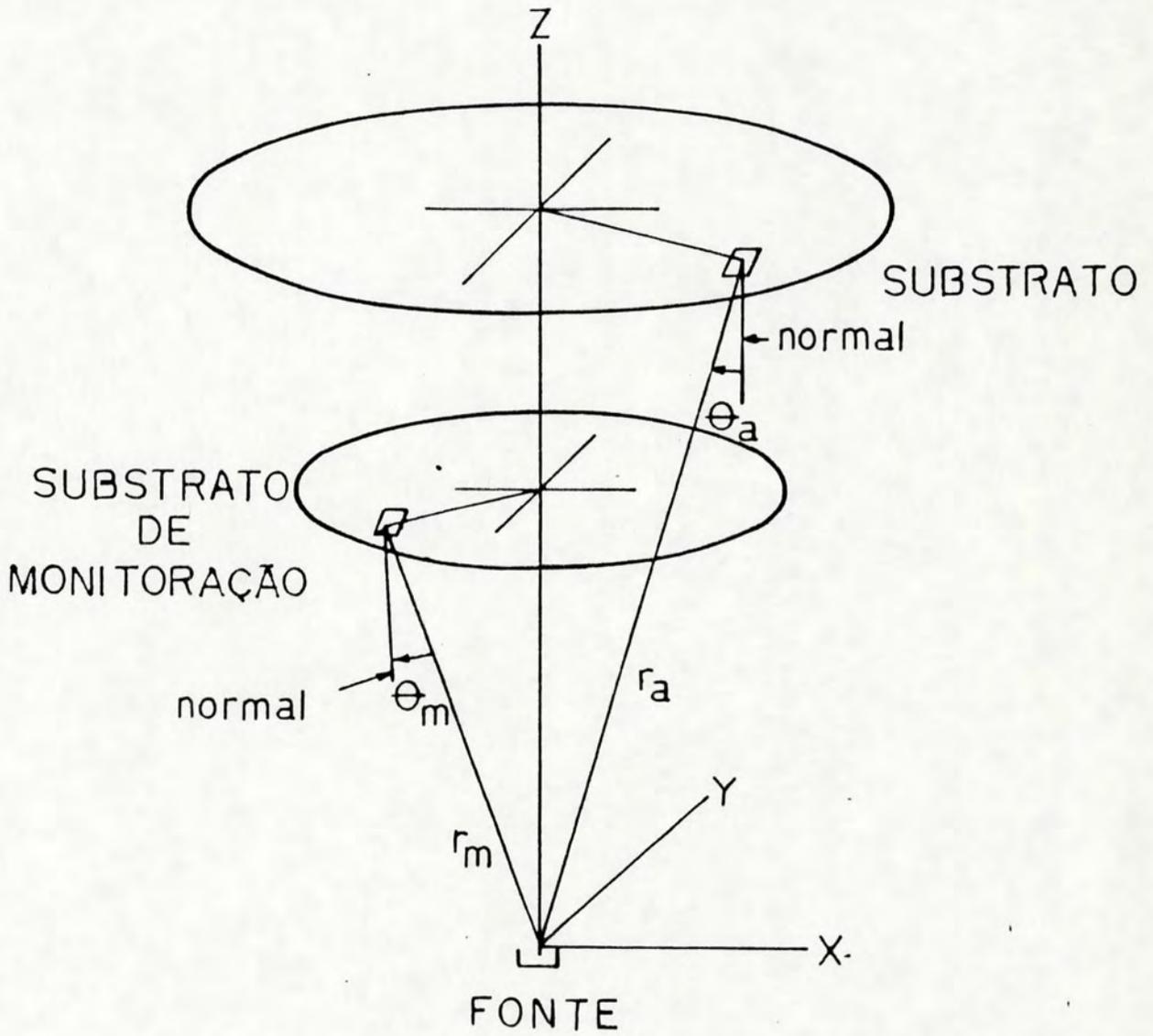


Fig. 2-6: Posicionamento do substrato de monitoração e do substrato para o filme.

comprimento de onda utilizado na monitoração  $\lambda_m$ , através de:

$$\lambda_a = F^{-1} \lambda_m \quad (2-47)$$

O fato de as fontes de evaporação não serem ideais implica que o fator de configuração deve ser corrigido empiricamente alterando-se as alturas dos substratos, se for necessária grande precisão no comprimento de onda de referência. Por outro lado, pode-se determinar precisamente o fator de configuração e utilizar a monitoração por nível de refletividade, ao invés da monitoração por ponto de virada descrita anteriormente.

Para realizar esta calibração precisa é necessário medir as espessuras das camadas depositadas no substrato de monitoração e no substrato amostra. Dividindo a primeira pela segunda obtemos o fator de configuração. O método usado por nós para medir espessura, que utiliza o espectro do fator de transmissão, está descrito no apêndice B.

A monitoração por nível de refletividade apresenta uma grande vantagem sobre a monitoração por ponto de virada: a possibilidade de monitorar filmes que não sejam uma sequência de camadas com espessuras múltiplas de um comprimento de onda de referência. No entanto, ela é muito mais complexa e sujeita a erros de operação.

O erro ocasionado na medida de espessura das camada, devido ao término da camada antes ou depois do ponto desejado, é potencialmente menor neste método do que no método do ponto de virada. Na figura 2-7 temos o gráfico do erro percentual na espessura em relação à espessura ótica, causado pela ultrapassagem do ponto de término da camada de um valor de 1% na refletividade relativa. Como refletividade relativa entendemos a refletividade absoluta subtraída da refletividade mínima do material de que é constituída a camada; esta diferença sendo dividida pela diferença entre o valor máximo e mínimo da refletividade do material. No gráfico consideramos um material com índice de refração igual a 2.35.

Dada uma espessura ótica  $(nd)_m$  em relação a um  $\frac{1}{4}$  de um comprimento de onda de referência  $\lambda_o$ , para obtermos a espessura ótica  $(nd)_m$  em relação a um  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda  $\lambda_L$  do laser utilizado na monitoração utilizamos que:

$$(nd)_m = F \frac{n(\lambda_L)}{n(\lambda_o)} \frac{\lambda_o}{\lambda_L} (nd)_m \quad (2-48)$$

onde  $n(\lambda_L)$  e  $n(\lambda_o)$  são os índices de refração para os comprimentos de onda dentro dos parênteses.

A partir desta espessura ótica, a ser atingida no substrato de monitoração, é possível determinar a

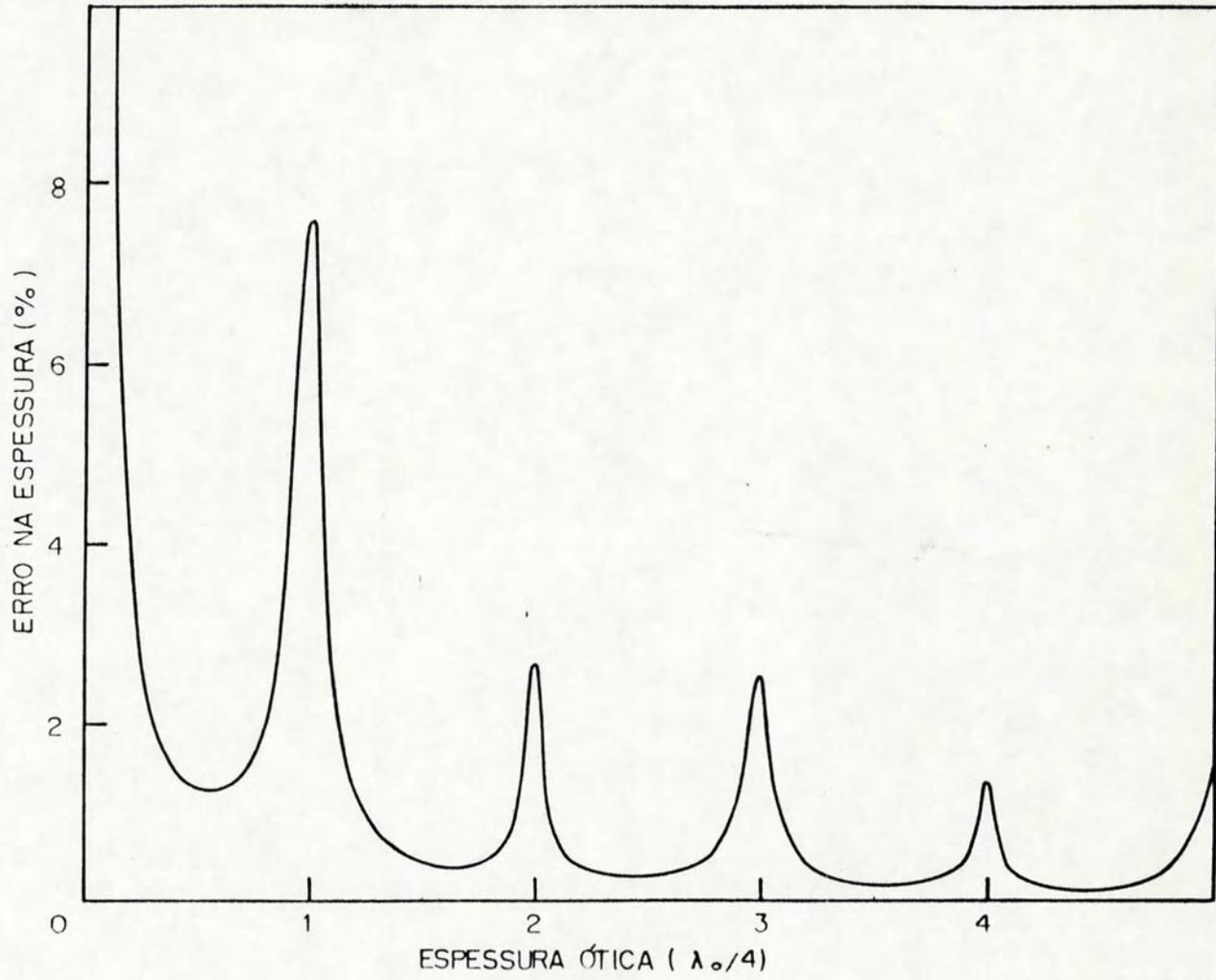


Fig. 2-7: Gráfico do erro percentual na espessura em função da espessura ótica.

refletividade relativa a que corresponde esta espessura com o auxílio da equação 2-44 e terminar a camada na espessura desejada. Notemos que é necessário que a espessura a ser obtida no substrato de monitoração seja maior que um  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda utilizado, pois, do contrário, é impossível determinar a refletividade relativa.

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo descreveremos o evaporador e o sistema de vácuo com que construímos nossos filmes. Após descreveremos a montagem para monitorar a espessura dos filmes e as demais montagens necessárias para evaporação, bem como os procedimentos utilizados durante a evaporação. Por fim, relataremos os resultados obtidos na construção de alguns filmes dielétricos.

## SUMÁRIO

- 3.1. Sistema de Vácuo Utilizado
- 3.2. Montagem do Monitorador de Espessura
- 3.3. Montagens e Procedimentos para Evaporação
  - 3.3.1. Montagem das Fontes de Evaporação
  - 3.3.2. Limpeza dos Substratos
  - 3.3.3. Procedimentos para Evaporação
- 3.4. Filmes Construídos
  - 3.4.1. Espelho Dielétrico
  - 3.4.2. Divisor de Feixe

### 3.1. Sistema de Vácuo Utilizado

O equipamento básico utilizado neste trabalho foi um evaporador construído em nosso laboratório. Na figura 3-1 está representado o sistema de vácuo junto com a campânula.

A campânula tem 62 cm de diâmetro interno e 75 cm de altura. A bomba rotativa é uma Edwards EDM-6 de 140 litros/s. A bomba difusora é uma Leybolds DO-101 de 100 litros/s. Os medidores de pressão M1 e M2 são do tipo Pirani da marca Edwards. O medidor M3 é um Medidor tipo Pirani construído em nosso laboratório (Mötter 1987). Por fim, o medidor M4 é um medidor de alto vácuo tipo Penning da Leybold-Heareus.

Na operação do sistema são necessários cerca de 30 minutos de bombeamento com a bomba rotativa para atingir um vácuo primário da ordem de 0,1 torr, suficiente para

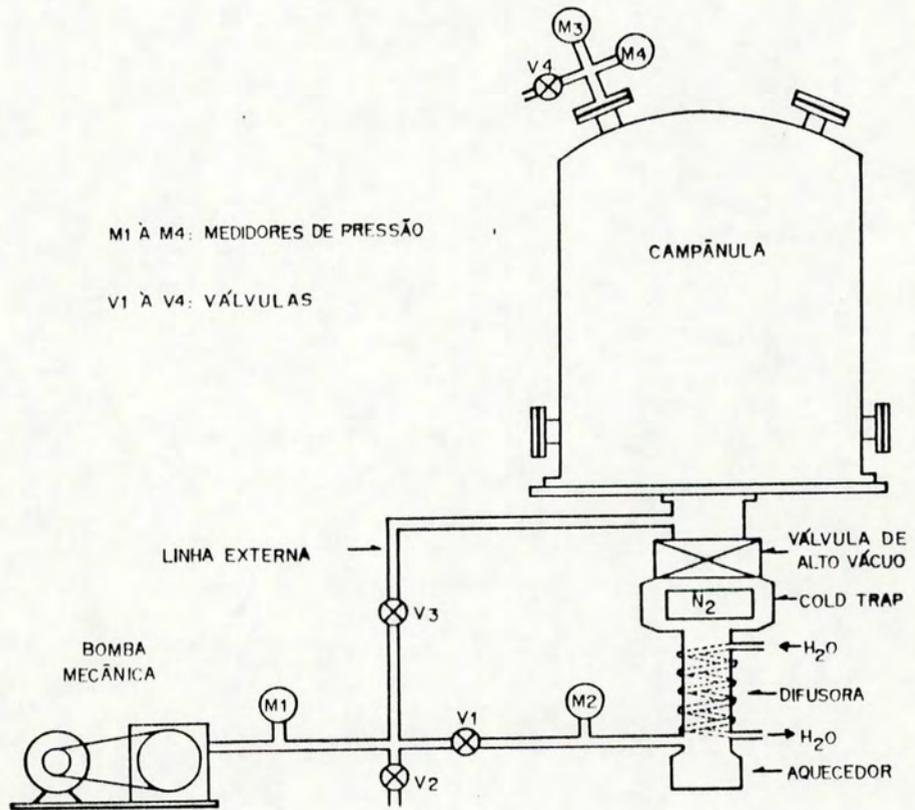


Fig. 13-1: Sistema de vácuo.

conectar a difusora ao sistema. Como o tempo para entrar em regime de funcionamento da difusora é da ordem de 30 minutos, todo o sistema pode ser ligado simultaneamente. O valor terminal da pressão do sistema, cerca de  $10^{-6}$  torr, é atingido em aproximadamente 90 minutos. A pressão de trabalho durante a evaporação é da ordem de  $4 \times 10^{-6}$  torr.

O interior da campânula é periodicamente limpo através do polimento das suas paredes e de todo o material que encontra-se em seu interior. Após cada limpeza, o interior da campânula é aquecido a cerca de  $100^{\circ}\text{C}$ , por duas horas, o que melhora o vácuo final obtido. Entre cada evaporação costuma-se aquecer a campânula por 20 minutos à temperatura anterior e realizar uma descarga "glow" entre dois eletrodos de alta tensão dentro da campânula.

### 3.2. Montagem do Monitorador de Espessura

Como fonte de luz utilizamos o feixe de um laser de He-Ne (633nm), o qual é interrompido por uma roda dentada ("chopper") C (veja figura 3-2). O feixe passa, em seguida, por um divisor de feixe DF, sendo a parte refletida utilizada para um pulso de disparo de um integrador chaveado. A parte transmitida incide no substrato de monitoração no interior da campânula com o auxílio de 3 espelhos E1, E2 e E3, montados em deslocadores de feixe. O

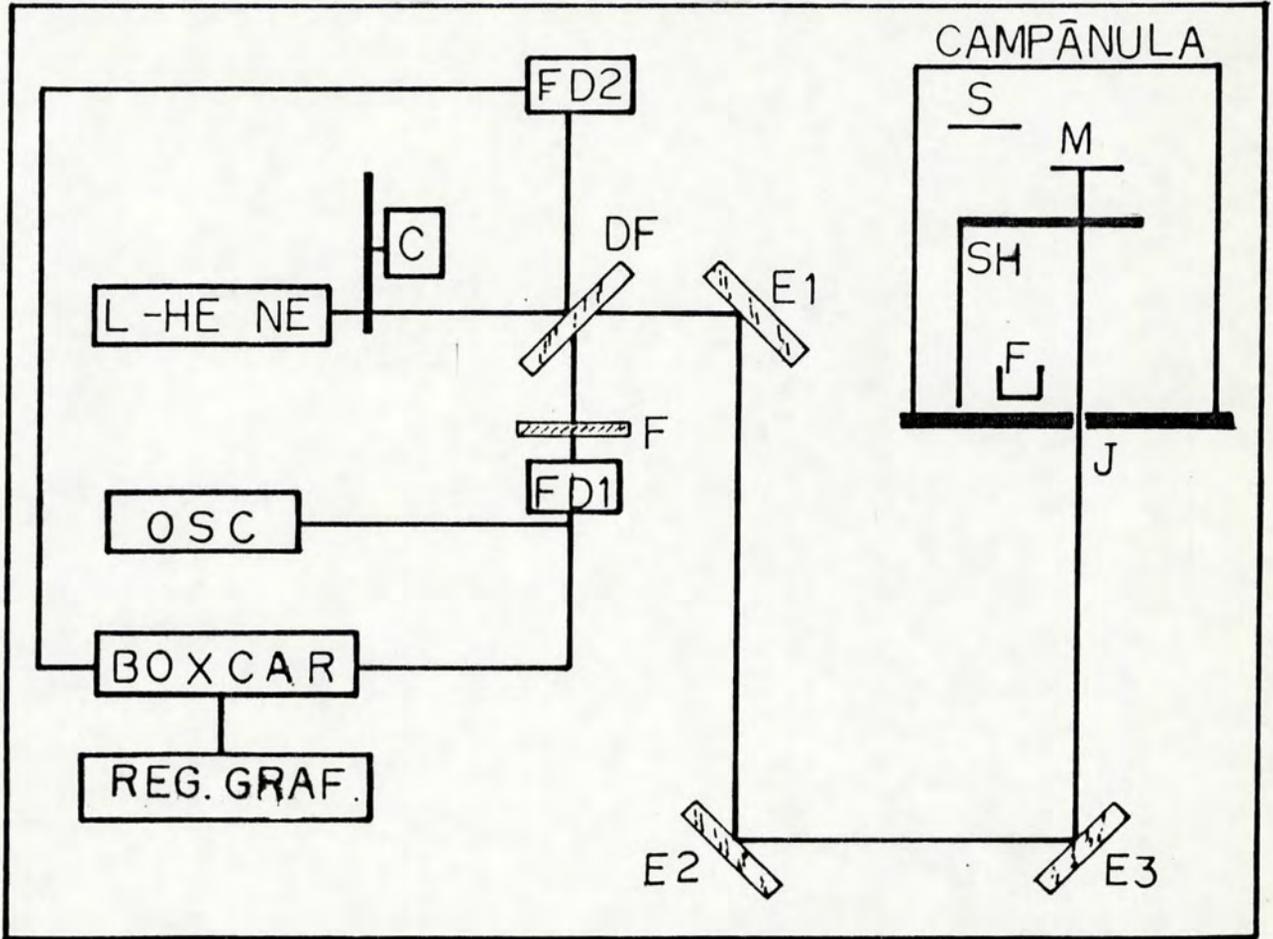


Fig. 3-2: Montagem do monitorador de espessura.

substrato de monitoração devolve o laser exatamente sobre si mesmo e o divisor de feixe DF o separa do incidente. Os 2 feixes refletidos no divisor de feixe incidem em dois fotodiodos idênticos, cuidadosamente polarizados para assegurar a linearidade do sinal no intervalo de intensidades de interesse. O filtro F serve para minimizar a influência de possíveis variações de luz do meio ambiente, tais como as variações de intensidade de luz das fontes de evaporação de material, no interior da campânula.

O sinal é processado num integrador chaveado de construção própria e logo graficado com um registrador gráfico ECB (RB-101). O registro gráfico da refletividade ajuda consideravelmente a finalização da camada na espessura desejada.

Na figura 3-3 temos o registro gráfico da monitoração de duas camadas. A primeira camada é de ZnS e a segunda de MgF<sub>2</sub>. O pequeno pulso que aparece no final de cada registro é ocasionado pela momentânea interrupção do feixe do laser pelo "shutter" SH, ao terminar a camada. O ganho do fotodiodo é alterado do primeiro para o segundo registro. O "shutter" é construído de forma que, mesmo com as fontes cobertas por ele, é possível medir o laser refletido no substrato de monitoração.

O substrato de monitoração é uma lâmina de

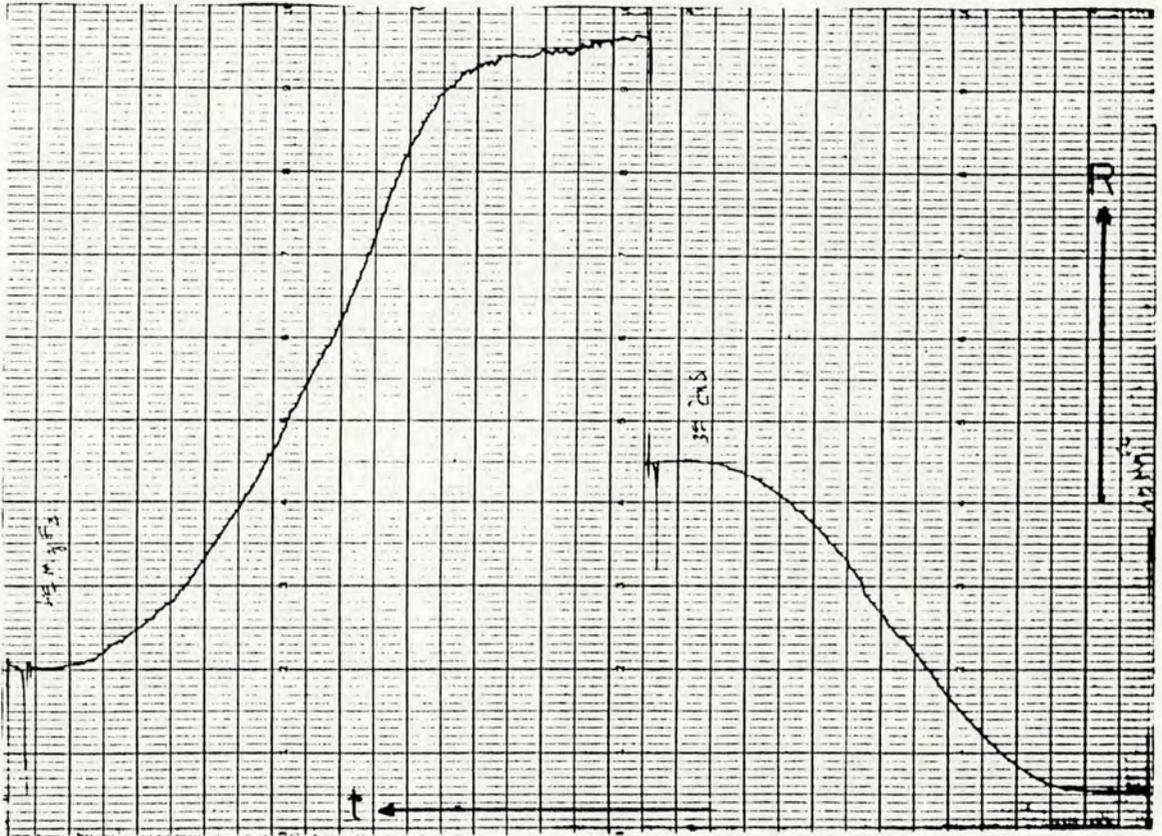


Fig. 3-3: Registro gráfico da monitoração de duas camadas.

microscópio de 75x22x1 mm, que desliza numa chapa metálica plana com uma janela de 0.5x1 cm, pela qual incide a luz do laser. Utilizamos um manipulador externo para movimentar a lâmina de maneira a expor regiões sem nenhum material depositado quando assim o desejamos. O número de camadas que é possível monitorar, em cada porção da lâmina, depende das características dos materiais a depositar e da precisão com que pretende-se trabalhar.

Como vemos, a montagem usada tem um mínimo de superfícies refletoras e transmissoras. Isto é vantajoso, já que, com exceção do substrato de monitoração, as outras superfícies onde incide a luz do laser não devem receber material evaporado, pois este mascara o sinal. Além disso, o monitorador apresenta grande facilidade de alinhamento e permanece alinhado durante a evaporação.

### 3.3. Montagens e Procedimentos para Evaporação

Nesta secção faremos várias observações sobre os procedimentos que utilizamos para evaporar os filmes dielétricos. Descreveremos, também, a montagem das fontes e o procedimento de limpeza dos substratos.

#### 3.3.1. Montagem das Fontes

Na construção dos filmes dielétricos utilizamos as seguintes fontes para evaporar os materiais: para o ZnS um cadinho de grafite de formato cilíndrico, com uma resistência para aquecimento, de formato helicoidal, colocada em volta; e para o  $MgF_2$  uma fonte de tungstênio com o formato de uma lâmina e uma depressão central para a colocação do material. Cada uma das fontes de material para evaporação foi aquecida por uma fonte de corrente independente.

A separação entre as fontes de evaporação foi a mínima possível, a fim de assegurar a uniformidade nos substratos. Notamos a necessidade de um anteparo entre as duas fontes de evaporação para evitar que o material evaporado de uma fonte não contaminasse o material da outra fonte. Quando isto acontecia, as camadas obtidas tinham baixa aderência e costumavam descascar.

### 3.3.2. Limpeza do Substrato

Utilizamos a seguinte sequência para a limpeza dos substratos utilizados na construção de filmes dielétricos com bons resultados:

- a) lavagem com água corrente e sabão neutro;

- b) lavagem com etanol comercial;
- c) ultra-som com água e sabão neutro;
- d) lavagem com água corrente;
- e) ultra-som com etanol comercial;
- f) lavagem com água destilada;
- g) ultra-som com água destilada;
- h) lavagem com água destilada;
- i) lavagem com etanol puro;
- j) secagem em jato de nitrogênio puro.

Após a limpeza, o substrato é imediatamente colocado na campânula, sendo esta fechada. Não utilizamos descarga "glow" na limpeza dos substratos, porque não dispomos de eletrodos com uma conformação adequada para evitar que o material ejetado das paredes contamine o substrato (Pulker 1984, 58), nem limpamos as paredes do evaporador a cada evaporação (Perry 1965, 989).

### 3.3.3. Procedimentos Durante a Evaporação

Na evaporação, tanto do  $MgF_2$  como do  $ZnS$ , mas principalmente do último, notamos que eram emitidos pequenos grânulos de material durante a evaporação e, eventualmente, todo o material era ejetado da fonte, nada restando. Uma das formas que encontramos para resolver este problema é cozinhar os materiais em vácuo durante 1 hora a uma

temperatura próxima a que o material se volatilizaria. Este processo é realizado antes de se colocar os substratos na campânula, pois se um pouco do material evaporar, existe uma possibilidade dele contaminar os substratos com uma fina película de material. Esta camada se depositaria a uma taxa muito pequena, a partir do material refletido pelas paredes da campânula, e comprometeria a qualidade do filme.

O aquecimento das fontes para cada evaporação de material foi realizado de forma gradual, com uma corrente inicial de 100 ampéres para o  $MgF_2$  e de 40 ampéres para o  $ZnS$ , levando cerca de 20 a 30 minutos para atingir a corrente final.

As taxas de evaporação usadas foram de 0,6 nm/s para  $ZnS$  e de 2 nm/s para  $MgF_2$ . A corrente para obter estas taxas foi determinada empiricamente. Para o  $ZnS$  utilizamos uma corrente final de 70 ampéres e para o  $MgF_2$  de 180 ampéres.

O "shutter" evitou a deposição de material nos substratos antes de a taxa de evaporação atingir o valor adequado. Assim que chegávamos à taxa adequada, expúnhamos os substratos. Durante os primeiros momentos o sinal permanecia estacionário (supomos que até formar uma monocamada que facilitasse a aderência das moléculas do dielétrico), depois passava a variar rapidamente. Quando era

atingida a espessura desejada, o "shutter" era acionado para interromper a deposição de material e, ao mesmo tempo, eram desligadas as fontes de corrente.

### 3.4. Filmes Construídos

Apresentaremos a construção de dois tipos de designs que mostram as duas formas possíveis de utilização do monitorador de espessura. Para representar o primeiro tipo de design, que utiliza a monitoração por ponto de virada, escolhemos os espelhos dielétricos. Dentro desta categoria, além destes, encontram-se os filtros de banda passante estreita e larga, camadas antirefletoras com 1 ou mais camadas, etc.

Para o segundo tipo de monitoração, por nível de refletividade, mostraremos as fases necessárias para a obtenção de um divisor de feixe 50-50, desde a obtenção do design que possua esta característica, a partir da otimização de um design de partida, até sua construção. Dentro desta categoria de filmes encontra-se o maior número de aplicações, como camadas antireflexivas de banda larga, divisores de feixe em geral, filtros de canto ("edge filters"), etc.

### 3.4.1. Espelhos Dielétricos

Os espelhos dielétricos multicamadas são uma aplicação clássica de filmes finos compostos de camadas alternadas de  $\lambda_0/4$  de dois materiais com índices de refração diferentes. Possuem a vantagem, sobre os recobrimentos metálicos, de não apresentarem perdas por absorção. São utilizados principalmente em interferômetros Fabry-Perot e em espelhos para lasers de potência.

Na construção destes espelhos, os substratos dos espelhos e de monitoração estavam, respectivamente, a 41 cm e 44 cm das fontes de evaporação em linha reta, com a normal das superfícies apontando aproximadamente para um ponto entre as fontes de evaporação. Isto dá um fator de configuração igual a 0,87 e um comprimento de onda de referência efetivo para os espelhos de 550 nm monitorando com o laser de He-Ne. Construímos espelhos dielétricos com diferentes números de camadas, até um máximo de 16 camadas.

Na figura 3-4a vemos o gráfico do fator de transmissão (linha sólida) para um espelho com 9 camadas de  $MgF_2$  e  $ZnS$  alternadas, começando com o primeiro material. Na mesma figura, temos o espectro calculado para este mesmo design, utilizando como comprimento de onda de referência 550 nm. Vemos que existe uma grande concordância entre os resultados. Estes espelhos foram utilizados, com sucesso, em

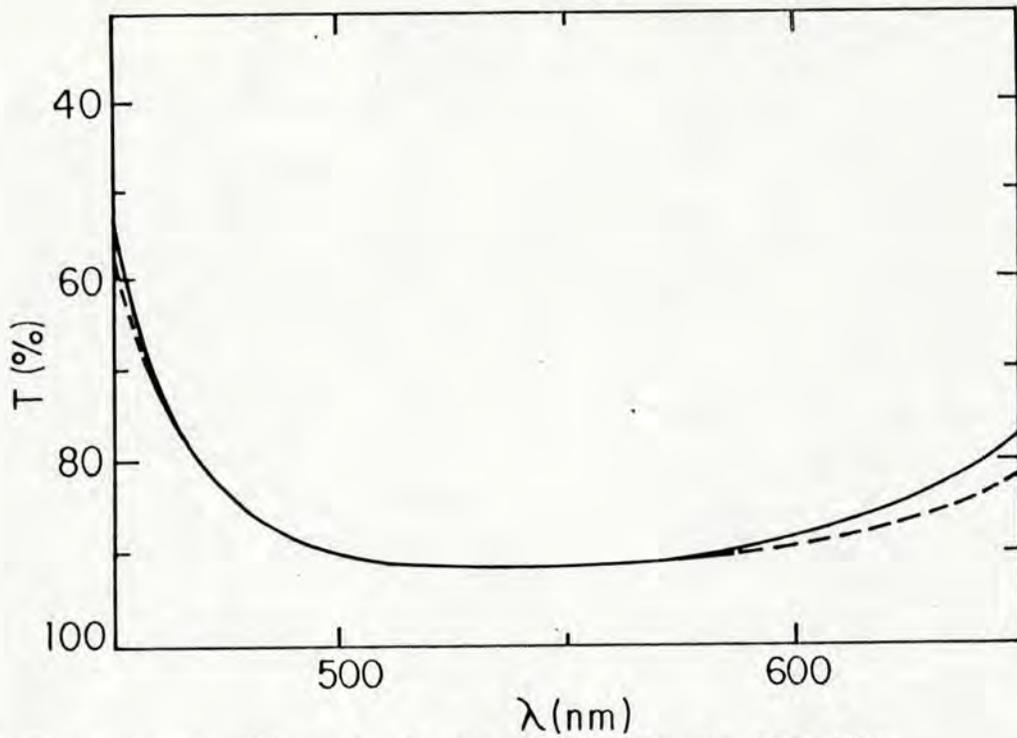


Fig. 3-4a: Gráfico da transmissão de um espelho dielétrico com 9 camadas.

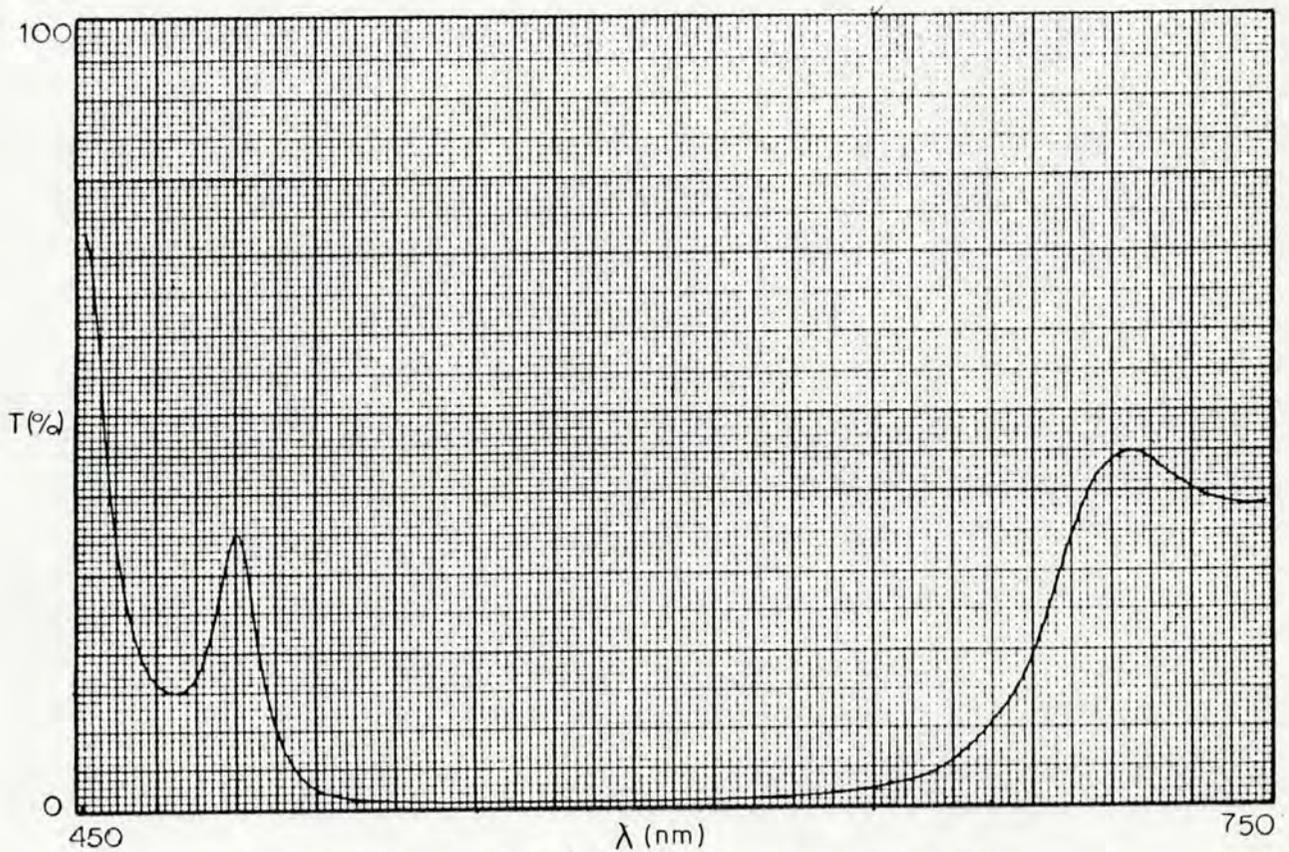


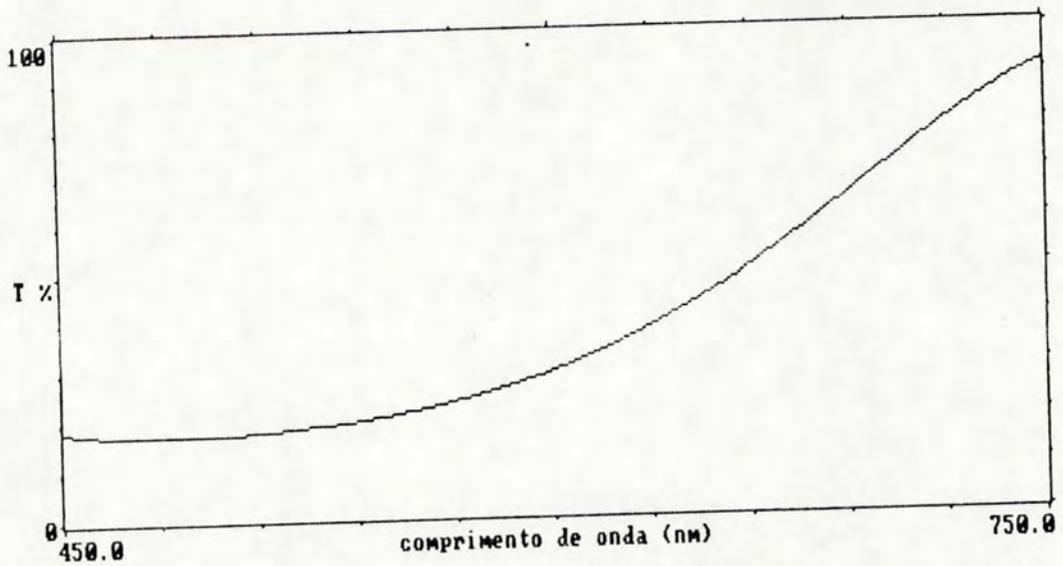
Fig. 3-4b: Gráfico da transmissão de um espelho dielétrico com 16 camadas.

um interferômetro Fabry-Perot no interior da cavidade de um laser de corante com Rhodamina 6G.

Na figura 3-4b temos o gráfico do fator de transmissão para um espelho dielétrico com 16 camadas alternadas, dos mesmos materiais já citados e na mesma ordem.

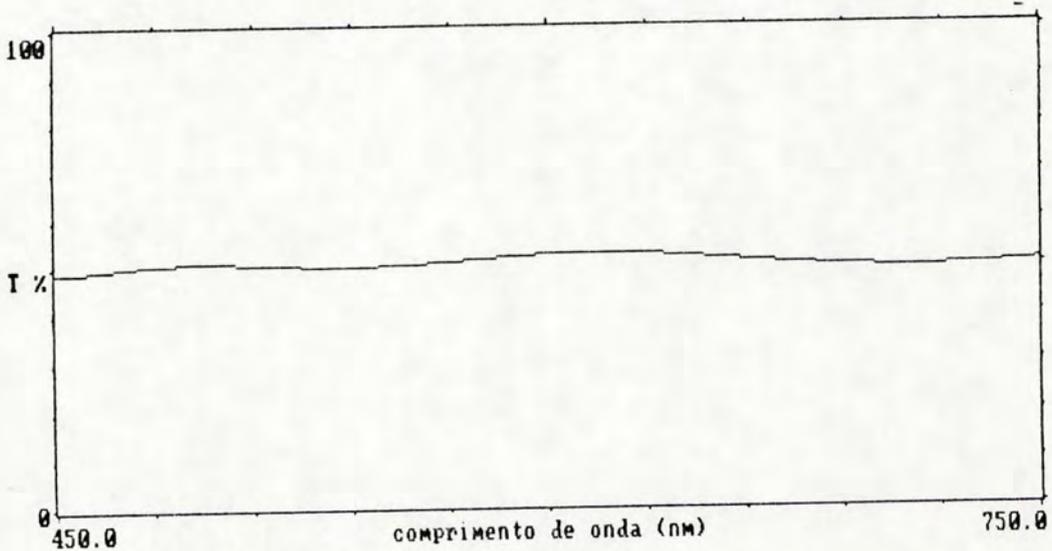
#### 3.4.2. Divisor de Feixe

Para desenhar um divisor de feixe 50%-50%, adotamos, como design de partida, um filme com 7 camadas alternadas de  $MgF_2$  e  $ZnS$ , começando com o primeiro material, com espessuras de  $\frac{1}{4}$  de um comprimento de onda de referência igual a 500nm. O gráfico de transmissão calculado para este design aparece na figura 3-5a. Após duas otimizações com o método simples ("golden section"), utilizando 6 iterações em cada camada, iniciando com a camada 7 e terminando com a camada 1, obtemos como resultado o filme da figura 3-5b. Aplicamos o método do gradiente neste design e obtemos o design da figura 3-5c. Observamos que a camada de número 2 tornou-se muito fina. Isto nos sugeriu retirar esta camada e somar as espessuras das camadas 1 e 3. A este design de 5 camadas aplicamos novamente o método do gradiente, obtendo, finalmente, o design da figura 3-5d, que é o design a partir do qual construímos o divisor de feixe.



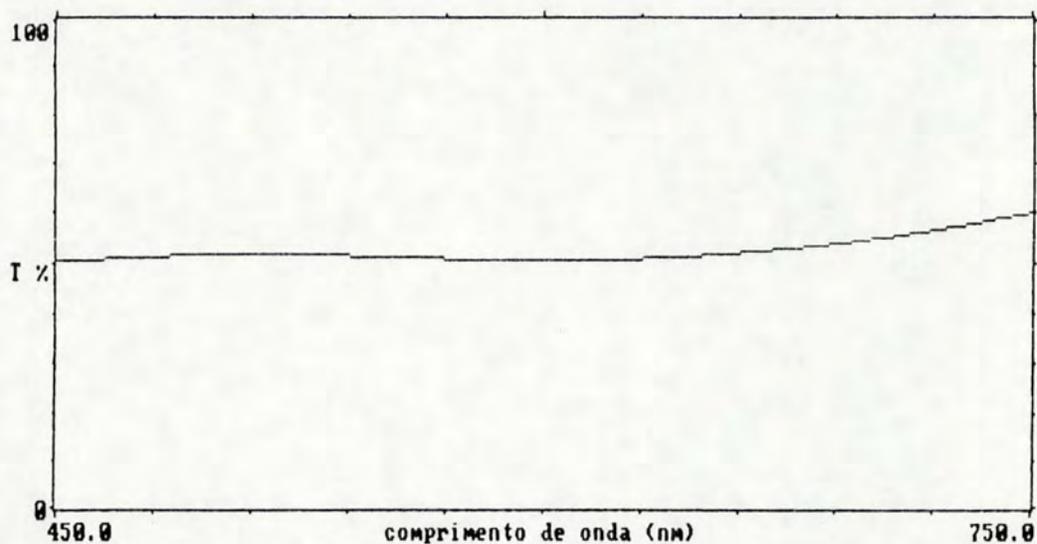
Nro. Cam.: 7 S=1 121312131213121 4=M  
 1:a=1.520 b=0.000E+00 2:a=1.380 b=2.023E+03 3:a=2.169 b=5.785E+04 4:a=1.000 b=0.000E+00  
 Correcoes: 1:1.00000 2:1.00000 3:1.00000 4:1.00000 5:1.00000 6:1.00000 7:1.00000  
 Lambda Referencia: 500.00nm Angulo Incidencia:0.00

Fig. 3-5a: Design de partida para o divisor de feixe.



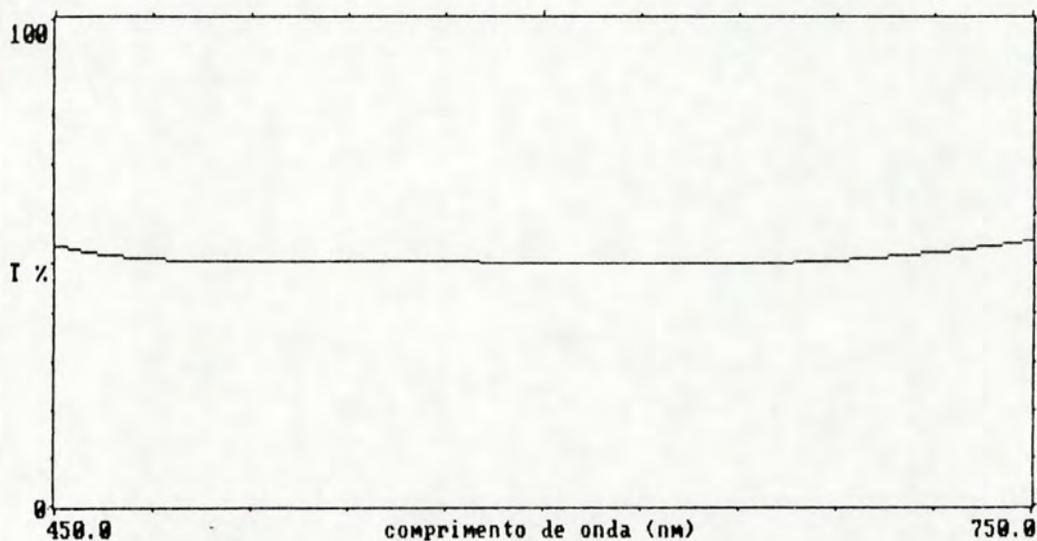
Nro. Cam.: 7 S=1 121312131213121 4=M  
 1:a=1.520 b=0.000E+00 2:a=1.380 b=2.023E+03 3:a=2.169 b=5.785E+04 4:a=1.000 b=0.000E+00  
 Correcoes: 1:0.88785 2:1.01184 3:0.78754 4:1.41308 5:1.79969 6:1.83800 7:0.94984  
 Lambda Referencia: 500.00nm Angulo Incidencia:0.00

Fig. 3-5b: Design anterior otimizado com "golden section".



Nro. Cam.: 7 S=1 121312131213121 4=M  
 1:a=1.520 b=0.000E+00 2:a=1.380 b=2.023E+03 3:a=2.169 b=5.785E+04 4:a=1.000 b=0.000E+00  
 Correcoes: 1:0.75213 2:0.09451 3:0.77430 4:1.12046 5:1.04937 6:1.06634 7:0.99262  
 Lambda Referencia: 500.00nm Angulo Incidencia:0.00

Fig. 3-5c: Design anterior otimizado com método do gradiente



Nro. Cam.: 5 S=1 12131213121 4=M  
 1:a=1.520 b=0.000E+00 2:a=1.380 b=2.023E+03 3:a=2.169 b=5.785E+04 4:a=1.000 b=0.000E+00  
 Correcoes: 1:1.83886 2:1.14251 3:1.13675 4:1.12768 5:1.13320  
 Lambda Referencia: 500.00nm Angulo Incidencia:0.00

Fig. 3-5d: Design anterior modificado e otimizado com método do gradiente.

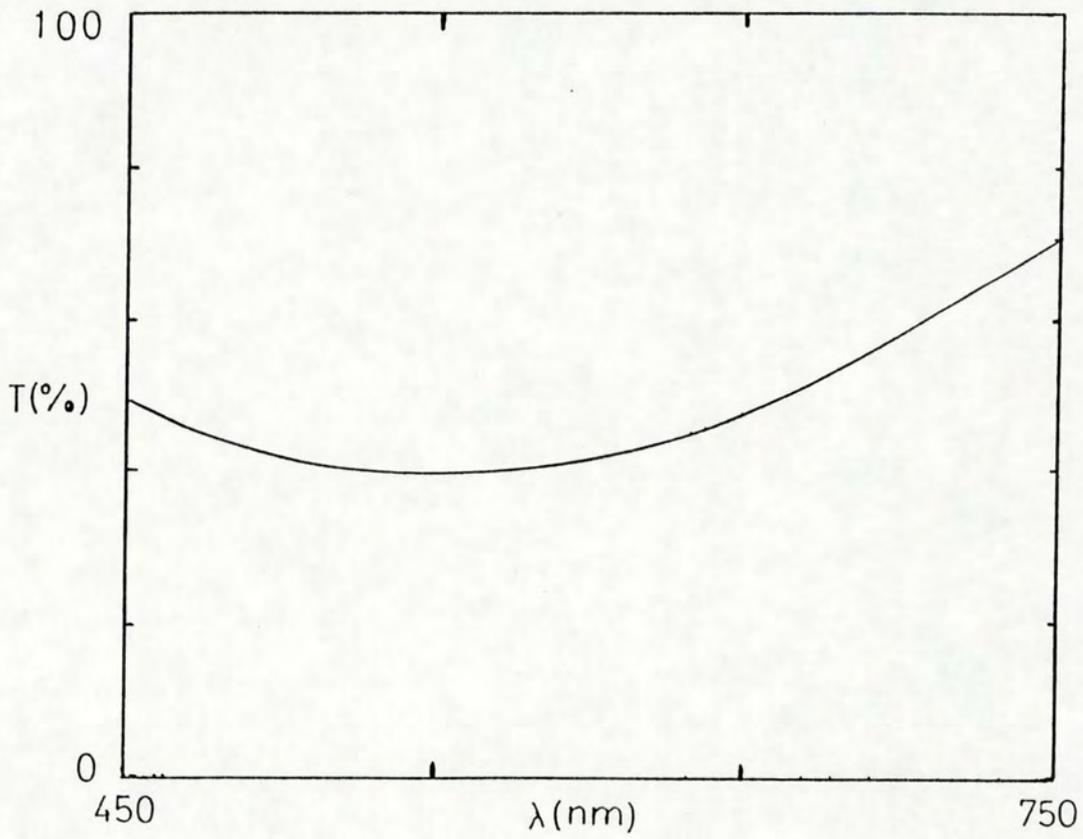


Fig. 3-5e: Gráfico do divisor de feixe construído.

Para a construção deste filme, montou-se o substrato de monitoração e o substrato para o filme a, aproximadamente, 25 e 45cm das fontes de evaporação. Medindo a espessura depositada no substrato do filme (veja apêndice B) correspondente a uma espessura ótica múltipla de  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda do laser, depositada no substrato de monitoração, determinamos a relação entre a espessura ótica no substrato do filme e a espessura ótica no substrato de monitoração. Para o ZnS obtemos:

$$(nd)_m = 2,26(nd)_s \quad (3-1)$$

e para o  $MgF_2$ :

$$(nd)_m = 2,76(nd)_s \quad (3-2)$$

Com o auxílio destas relações e da equação 2-44 calculamos os valores de refletividade relativa a que correspondem as espessuras das camadas do design do divisor de feixe. Utilizando estes resultados, construímos o filme desenhado, cuja transmissão está representada na figura 3-5e. Podemos ver que, qualitativamente, ele apresenta o comportamento predito.

Uma das possíveis causas da discrepância quantitativa, entre o espectro calculado e o observado, está relacionada com a dificuldade de determinar precisamente o

valor do fator de configuração, pois a medida da espessura da camada depositada é muito crítica. Como o método por nós utilizado envolve a determinação de um ponto extremo de refletividade, é fundamental um espectrofotômetro muito preciso, de que não dispunhamos.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho discutimos a obtenção de filmes finos dielétricos para aplicações em ótica. Demonstramos a utilidade de processos de otimização no desenho e durante a construção destes filmes. Estudamos os parâmetros experimentais que influenciam nas características do filme e formas de controlá-los. Em especial, estudamos a monitoração da espessura dos filmes finos. Construimos um sistema de monitoração simples e mostramos suas potencialidades na construção de designs com camadas múltiplas de um quarto de um comprimento de onda de referência e de designs sem esta relação entre as camadas.

Cabe salientar que grande parte do equipamento utilizado no sistema de monitoração foi desenvolvido, ao menos parcialmente, em nosso laboratório. O sistema

desenvolvido mostrou-se útil e de fácil utilização.

Uma extensão deste trabalho pode ser feita para incluir filmes com absorção, de forma a poder utilizar camadas dielétricas que apresentem absorção na região do laser utilizado e camadas metálicas.

Um outro ponto que pode ser implementado é a melhora na instrumentação através de uma interface com um microcomputador, o qual realizaria as medidas de refletividade e possibilitaria uma semi-automação do sistema. Outra vantagem seria que equipamentos mais sofisticados como o osciloscópio, o integrador chaveado e o registrador gráfico, não seriam necessários.

## APÊNDICE A: LISTAGEM DO PROGRAMA PARA CÁLCULO E OTIMIZAÇÃO DE FILMES FINOS

Apresentamos, aqui, a listagem do programa para cálculo e otimização de filmes finos desenvolvido por nós. O programa foi testado em mais de um microcomputador e, a princípio, pode rodar em qualquer máquina que disponha de um compilador Turbo Pascal (isto inclui máquinas que rodam CP/M, CP/M-86, MS-DOS e microcomputadores MacIntosh). Salientamos que as rotinas para traçar gráficos na tela não são disponíveis em todos compiladores, mesmo quando o microcomputador possui esta característica. Este é o caso dos computadores da linha MSX que, apesar de terem capacidades gráficas, precisam que as rotinas gráficas sejam desenvolvidas pelo usuário, pois o compilador não dispõe de tais rotinas em sua biblioteca padrão. Na listagem consta apenas a versão básica, não estando incluídos casos especiais como o mencionado.

```
PROGRAM SOURCEFilmRef1;
```

```
{***** Versao 2.0 *****}
{Este programa calcula a refletividade}
{ou transmissao de filmes dieletricos }
{multicamadas, permite a manipulacao }
{destes resultados, bem como a otimiza }
{cao de um determinado design em rela }
{cao a um comportamento idealizado. }
```

```
CONST
```

```
MaxNroCam=101;
MaxNroPtos=600;
MaxNroRel=6;
```

```
TYPE
```

```
MatrIndRefr=array[1..MaxNroRel,-4..MaxNroPtos] of Real;
MatrDesign=array[0..MaxNroCam] of Byte;
MatrCorr=array[1..MaxNroCam] of Real;
MatrRef1= array[0..MaxNroPtos] of real;
Str2=string[2];
```

```
VAR
```

```
NroCam           : Integer;
NroRel           : Byte;
IndRefr         : MatrIndRefr;
Design          : MatrDesign;
Corr            : MatrCorr;
LambPi,LambIn,LambFin,passo,AngInc : Real;
Pol             : Str2;
NroPtos,kMerito : Integer;
Ref1,Ref1Ideal,Tol : MatrRef1;
Param,Calculado,Gravado,Curva,Indic,Tolerancia,
potencia        : Boolean;
Opcao           : Char;
Reinicializa    : String[4];
```

```
LABEL
```

```
Inicio;
{*****}
```

```
Procedure Inicializacao;
```

```
{Esta procedure apresenta os creditos }
{do programa quando da sua inicializa- }
{cao }
}
```

```
Begin;
```

```
TextMode(0);
clrscr;
gotoxy(11,5);
writeln('PROGRAMA FILMREF1');
gotoxy(13,6);
```

```
writeln('versao 2.0');
gotoxy(1,12);
write('Este programa calcula a refletividade de');
write('um conjunto de filmes finos dieletricos,');
write('otimiza designs e permite a manipulacao');
write('dos resultados.');
```

```
gotoxy(3,23);
write('por Jandir Miguel Hickmann, 1987.');
```

```
gotoxy(40,24);
Param:=false;Calculado:=false;Gravado:=false;Curva:=false;
Indic:=false;Tolerancia:=false;Potencia:=false;
delay(2000);
End(Inicializacao);
{*****}
```

#### Procedure Menu;

```
{Esta procedure apresenta o Menu Prin }
{cipal na tela e le a opcao escolhida }
{na variavel opcao para o case do pro }
{grava principal. }
```

```
Begin;
ClrScr;
write('          PROGRAMA FILMREFL.');
```

```
GotoXY(1,5);
Writeln(' Voce deseja:');
```

```
Writeln;
Writeln;
Writeln;
Writeln(' a.Entrar com os parametros do filme.');
```

```
Writeln(' b.Mudar os parametros do filme.');
```

```
Writeln(' c.Obter os parametros atuais do filme.');
```

```
Writeln(' d.Calcular a refletividade do filme.');
```

```
Writeln(' e.Obter uma tabela de refletividades.');
```

```
Writeln(' f.Obter um grafico de refletividade.');
```

```
Writeln(' g.Gravar os resultados no disco.');
```

```
Writeln(' h.Ler resultados gravados no disco.');
```

```
Writeln(' i.Otimizar o design do filme.');
```

```
Writeln(' j.Voltar ao sistema operacional.');
```

```
GotoXY(20,24);
read(kbd,Opcao);
End(Menu);
{*****}
```

#### Procedure CalculaIndices;

```
{Esta procedure calcula os indices de }
{refracao a partir da relacao de dis }
{persao completando a matriz IndRefr }
```

```
var
k1,k2          :integer;
```

```

Begin;
clrscr;gotoxy(1,10);
write('Aguarde um instante.');
```

gotoxy(40,24);

```

For k1:=1 to NroRel
Do For k2:=0 to NroPtos-1
  Do IndRefr[k1,k2]:=IndRefr[k1,-1]+IndRefr[k1,-2]/SQR(LambIn+passo*k2);
Indic:=true;
End( CalculaIndices);
{*****}

Procedure CalculaRefletividade;

{Calcula a refletividade do filme cujos}
{parametros foram fornecidos, guardando}
{os resultados na matriz Refl      }

Var
  kd,Beta,P,teta,a,M1,M2,M3,M4,N1,N2,N3,N4,O1,O2,O3,O4 : real;
  k1,k2 : integer;

Begin;
If AngInc=0
then Begin;
  For k1:=0 to NroPtos-1
  do Begin;
    kd:=LambPi/(LambIn+passo*k1);
    M1:=1;M2:=0;M3:=0;M4:=1;
    For k2:=1 to NroCam
    do Begin;
      Beta:=kd*Corr[k2];
      N1:=cos(Beta);
      N2:=sin(Beta)/IndRefr[Design[k2],k1];
      N3:=sin(Beta)*IndRefr[Design[k2],k1];
      N4:=N1;
      O1:=M1*N1-M2*N3;
      O2:=M1*N2+M2*N4;
      O3:=M3*N1+M4*N3;
      O4:=M4*N4-M3*N2;
      M1:=O1;
      M2:=O2;
      M3:=O3;
      M4:=O4;
    End (do For k2);
    N1:=M1*IndRefr[Design[0],k1];
    N2:=M2*IndRefr[Design[NroCam+1],k1]*IndRefr[Design[0],k1];
    N4:=M4*IndRefr[Design[NroCam+1],k1];
    Refl[k1]:=(SQR(M1-M4)+SQR(M2-M3))/(SQR(M1+M4)+SQR(M2+M3));
  End (do For k1);
  Exit;
End(do if AngInc=0)
Else
If Pol='TE'
then begin;
```

```

For k1:=0 to NroPtos-1
do Begin;
  teta:=AngInc;
  kd:=LambPi/(LambIn+passo*k1);
  M1:=1;M2:=0;M3:=0;M4:=1;
  For k2:=1 to NroCam
  do Begin;
    Beta:=kd*Corr[k2];
    a:=IndRefr[Design[k2-1],k1]*sin(teta)/IndRefr[Design[k2],k1];
    teta:=ArcTan(a/SQRT(1-Sqr(a)));
    P:=IndRefr[Design[k2],k1]*cos(teta);
    N1:=cos(Beta);
    N2:=sin(Beta)/P;
    N3:=sin(Beta)*P;
    N4:=N1;
    O1:=M1*N1-M2*N3;
    O2:=M1*N2+M2*N4;
    O3:=M3*N1+M4*N3;
    O4:=M4*N4-M3*N2;
    M1:=O1;
    M2:=O2;
    M3:=O3;
    M4:=O4;
  End {do For k2};
  a:=IndRefr[Design[NroCam],k1]*sin(teta)/IndRefr[Design[NroCam+1],k1];
  teta:=ArcTan(a/SQRT(1-Sqr(a)));
  M1:=M1*IndRefr[Design[0],k1]*cos(anginc);
  M2:=M2*IndRefr[Design[NroCam+1],k1]*IndRefr[Design[0],k1]*cos(teta)*cos(anginc);
  M4:=M4*IndRefr[Design[NroCam+1],k1]*cos(teta);
  Refl[k1]:=(SQR(M1-M4)+SQR(M2-M3))/(SQR(M1+M4)+SQR(M2+M3));
  End {do For k1};
End{if Pol='TE'}
else begin:{if Pol='TM'}
For k1:=0 to NroPtos-1
do Begin;
  teta:=AngInc;
  kd:=LambPi/(LambIn+passo*k1);
  M1:=1;M2:=0;M3:=0;M4:=1;
  For k2:=1 to NroCam
  do Begin;
    Beta:=kd*Corr[k2];
    a:=IndRefr[Design[k2-1],k1]*sin(teta)/IndRefr[Design[k2],k1];
    teta:=ArcTan(a/SQRT(1-Sqr(a)));
    P:=IndRefr[Design[k2],k1]/cos(teta);
    N1:=cos(Beta);
    N2:=sin(Beta)/P;
    N3:=sin(Beta)*P;
    N4:=N1;
    O1:=M1*N1-M2*N3;
    O2:=M1*N2+M2*N4;
    O3:=M3*N1+M4*N3;
    O4:=M4*N4-M3*N2;
    M1:=O1;
    M2:=O2;

```

```

      M3:=03;
      M4:=04;
      End {do For k2};
      a:=IndRefr[Design[k2-1],k1]*sin(teta)/IndRefr[Design[k2],k1];
      teta:=ArcTan(a/SQRT(1-Sqr(a)));
      M1:=M1*IndRefr[Design[0],k1]/cos(anginc);
      M2:=M2*IndRefr[Design[NroCam+1],k1]*IndRefr[Design[0],k1]/(cos(anginc)*cos(teta));
      M4:=M4*IndRefr[Design[NroCam+1],k1]/cos(teta);
      Refl[k1]:=(SQR(M1-M4)+SQR(M2-M3))/(SQR(M1+M4)+SQR(M2+M3));
      End {do For k1};
      End {else if Pol='TE'}
End(CalculaRefletividade);
{*****}

```

#### Procedure CalculaFilme;

```

{Avisa na tela que esta se processando }
{o calculo da refletividade , prepara }
{os parametros a serem enviados a proce}
{dure CalculaRefletividade, chamando-a }
{em seguida.Controla variaveis logicas.}

Begin;
If (Param=false)or(Calculado=true) then exit;
passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
if Indic=false then CalculaIndices;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Estou calculando.');
```

Pode levar algum tempo ...');

```

gotoxy(40,24);
CalculaRefletividade;
Calculado:=true;
End {CalculaFilme};
{*****}

```

#### Procedure LeParam;

```

{Este procedure le os parametros que }
{caracterizam o filme cuja refleti- }
{vidade deseja-se calcular }

```

#### Var

```

  Ans      : Char;
  k        : integer;

```

#### Label

```

  Lab1;

```

```

Begin;
Clrscr;gotoxy(1,10);
if (Calculado=true)and(Gravado=false)
then begin;
  writeln('Voce nao deseja antes gravar um arquivo');
```

```

write('com os dados atuais?(s/n) ');
read(kbd,ans);
if ans in ['s','S'] then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
end;
writeln('Qual o numero de camadas do filme? ');
write('(max ',MaxNroCam-1,') ');
Readln(NroCam);
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Quantos indices de refracao serao ');
write('necessarios? (max ',MaxNroRel,') ');
Read(NroRel);
Clrscr;
writeln('n(lambda)=a+b/SQR(lambda)');
writeln('                Lambda em nm.');
```

writeln;

writeln('Entre com as relacoes de dispersao:');

writeln;

For K:=1 to NroRel

Do Begin;

    Write('Relacao ',K,': a=');

    Read(IndRefr[k,-1]);

    IndRefr[k,-2]:=0;

    Write(' b=');

    Readln(IndRefr[k,-1]);

    IndRefr[k,-3]:=0;

    IndRefr[k,-4]:=0;

End;

clrscr;

writeln('Entre com o design do filme fornecendo');

writeln('o numero da relacao a ser utilizada em');

writeln('cada camada e no substrato e meio:');

writeln;

write('Substrato: ');

Readln(Design[NroCam+1]);

writeln;

For k:=1 to NroCam

Do begin;

    write('Camada ',k,': ');

    Readln(Design[NroCam+1-k]);

end;

writeln;

write('Meio : ');

readln(Design[0]);

For k:=1 to NroCam Do Corr[k]:=1;

Clrscr;Gotoxy(1,10);

Writeln('Voce deseja alguma camada diferente de');

writeln('lambda de referencia sobre quatro?(s/n)');

read(kbd,Ans);

Lab1: { comeco do laço para ler correcoes das camadas}

    Begin;

        If Ans in ['s','S']

        Then Begin

            Clrscr;Gotoxy(1,10);

```

Write('Qual camada? ');
Read(K); If K>NroCam then goto Lab1;
clrscr; gotoxy(9,5);
write(' Modificando camada ',K);
gotoxy(1,10);
writeln('Se o valor da espessura for:');
gotoxy(1,12);
writeln(' =1: camada igual a lambda ref./4');
writeln(' >1: camada maior que lambda ref./4');
writeln(' <1: camada menor que lambda ref./4');
gotoxy(1,20);
write('Entre com o valor da espessura: ');
read(corr[NroCam+1-K]);
clrscr; gotoxy(1,10);
write('Voce deseja alterar outra camada? (s/n) ');
read(kbd.ans);
end;
if ans in ['s','S'] then Goto Lab1
End; {Fim do laço para ler correcoes}
clrscr; gotoxy(1,10);
Write('Qual o compr. de onda de referencia? (em nm) ');
Read(LambPi); LambPi:=LambPi*PI/2;
Clrscr; gotoxy(1,10);
Write('Qual o compr. de onda inicial para o calculo?');
Write(' (em nm) ');
Read(LambIn);
Clrscr; gotoxy(1,10);
Write('Qual o compr. de onda final para o calculo?');
Write(' (em nm) ');
Read(LambFin);
clrscr; gotoxy(1,10);
write('Qual o angulo de incidencia com a normal');
write('em graus? ');
Read(AngInc);
AngInc:=AngInc*PI/180;
Pol:=' ';
If AngInc<>0 then Begin;
    clrscr; gotoxy(1,10);
    Write('Qual a polarizacao? (tm ou te) ');
    Read(Pol);
    If Pol='te' then Pol:='TE';
    If Pol='tm' then Pol:='TM';
End;
clrscr; gotoxy(1,10);
writeln('Quantos pontos devem ser calculados?');
write('(max ',MaxNroPtos,') ');
read(NroPtos);
Param:=True; Calculado:=false; Gravado:=false; Indic:=false; curva:=false;
Tolerancia:=false;
End{LeParam};
{*****}

Procedure MudaParam;

```

```

{Este procedure muda os parametros que }
{caracterizam o filme cuja refleti- }
{vidade deseja-se calcular. }

Var
  Ans          : Char;
  k,NovoProCam : integer;

Label
  Inicio,Lab1,Lab2,Lab3,Lab4,Lab5,Lab6,Lab7,Lab8;

Begin;
If Param=false then exit;
If (Calculado=true)and(Gravado=false)
then begin;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('Voce nao deseja antes gravar um arquivo');
  write('com os dados atuais?(s/n) ');
  read(kbd,ans);
  if ans in ['s','S'] then exit;
  end;
Calculado:=false;Gravado:=false;
Inicio:
  begin;
  Clrscr;
  writeln('          PROGRAMA FILAREFL. ');
  Gotoxy(3,3);
  WriteLn('Voce deseja mudar: ');
  writeln;
  writeln('a) o numero de camadas');
  writeln;
  writeln('b) alguma relacao de dispersao. ');
  writeln;
  writeln('c) o design do filme. ');
  writeln;
  writeln('d) a espessura de alguma camada. ');
  writeln;
  writeln('e) o compr. de onda de referencia. ');
  writeln;
  writeln('f) o compr. de onda inicial e final. ');
  writeln;
  writeln('g) o ang. de inc. e a polarizacao. ');
  writeln;
  writeln('h) o numero de pontos a serem calculados. ');
  writeln;
  writeln('i) voltar ao menu principal. ');
  gotoxy(20,24);
  read(kbd,ans);
  Case ans of
    'a':goto lab1;
    'b':goto lab2;
    'c':goto lab3;
    'd':goto lab4;
    'e':goto lab5;

```

```

'f':goto lab6;
'g':goto lab7;
'h':goto lab8;
'i':exit;
end:{do case}
end:{do label inicio}

```

Lab1:

```

begin;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o numero de camadas? ');
write('(max ',MaxNroCam-1,') ');
Readln(NovoNroCam);
if NovoNroCam>NroCam
then begin;
  for k:=NroCam+1 to NovoNroCam
  do Corr[k]:=1;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  write('Nao esqueca de introduzir os indices de refracao das novas camadas. ');
  gotoxy(1,24);
  write(' (Tecla Return para continuar.) ');
  read(kbd,ans);
  for k:=0 to NroCam
  do Design[NovoNroCam+1-k]:=Design[NroCam+1-k];
  for k:=0 to NroCam-1
  do Design[NovoNroCam-k]:=Design[NroCam-k];
  end;
if NovoNroCam<NroCam
then begin;
  for k:=1 to NovoNroCam+1
  do Design[k]:=Design[NroCam-NovoNroCam+k];
  for k:=1 to NovoNroCam
  do Corr[k]:=Corr[NroCam-NovoNroCam+k];
  end;
NroCam:=NovoNroCam;
goto inicio;
end:{lab1}

```

Lab2:

```

begin;
clrscr;Gotoxy(1,10);
Writeln('Qual a relacao de dispersao que voce');
Write('deseja alterar? ');
Readln(k);
if k>6 then goto Lab2;
Clrscr;gotoxy(1,7);
if k>NroRel then NroRel:=k;
Writeln(' n(lambda)=a+b/SQR(lambda)');
Writeln;
Writeln('Entre com as constantes da relacao ',k,':');
Writeln;
Write('a=');
Read(IndRefr[k,-1]);
Write(' b=');
Read(IndRefr[k,-2]);
clrscr;gotoxy(1,10);

```

```

Writeln('Voce deseja alterar outra relacao de');
Write('dispersao? (s/n) ');
read(kbd,ans);
If ans in ['s','S'] then goto Lab2;
Indic:=false;
goto inicio;
end:{lab2}

Lab3:
begin;
Clrscr;
writeln('          CAMADAS');
writeln('SUBSTRATO=011121...INROCAMINROCAM+1=MEIO');
gotoxy(1,10);
write('Qual a camada que voce deseja alterar o ind. de refracao? ');
read(k);if k>NroCam then goto Lab3;
clrscr;gotoxy(1,10);
Writeln('Entre com o nro. da relacao de dispersao');
write('para a camada ',k,':');
Read(Design[NroCam+1-k]);
clrscr;gotoxy(1,10);
write('Voce deseja alterar outra camada? (s/n) ');
read(kbd,ans);
if ans in ['s','S'] then goto lab3;
goto inicio;
end{lab3};

Lab4:
begin;
Clrscr;Gotoxy(1,10);
Writeln('A espessura de qual camada deve ser ');
Write('alterada? ');
Read(K);If K>NroCam then goto lab4;
clrscr;gotoxy(9,5);
write(' Modificando camada ',K);
gotoxy(1,10);
writeln('Se o valor da espessura for:');
gotoxy(1,12);
writeln(' =1: camada igual a lambda ref./4');
writeln(' >1: camada maior que lambda ref./4');
writeln(' <1: camada menor que lambda ref./4');
gotoxy(1,20);
write('Entre com o valor da espessura: ');
read(corr[NroCam+1-K]);
clrscr;gotoxy(1,10);
write('Voce deseja alterar outra camada? (s/n) ');
read(kbd,ans);
if ans in ['s','S'] then Goto Lab4;
goto inicio;
end{lab4}

Lab5:
begin;
Clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('O comprimento de onda de referencia ');
writeln('atual e ',LambPi*2/PI:6:2,' nm. ');
writeln;

```

```

Writeln('Qual o novo compr. de onda de referencia?');
write('em nm ');
Read(LambPi);LambPi:=LambPi*PI/2;
goto inicio;
end {lab5};

Lab6:
begin;
Clrscr;gotoxy(1,10);
Write('Qual o compr. de onda inicial para o calculo?');
Write(' em nm ');
Read(LambIn);
Clrscr;gotoxy(1,10);
Write('Qual o compr. de onda final para o calculo?');
Write(' em nm ');
Read(LambFin);
Indic:=false;Curva:=false;Tolerancia:=false;
goto inicio;
end {lab6};

Lab7:
begin;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o angulo de incidencia com a');
write('normal em graus? ');
Read(AngInc);
AngInc:=AngInc*PI/180;
Pol:=' ';
If AngInc<>0 then Begin;
                clrscr;gotoxy(1,10);
                Write('Qual a polarizacao? (tm ou te) ');
                Read(Pol);
                If Pol='te' then Pol:='TE';
                If Pol='tm' then Pol:='TM';
                End;

goto inicio;
end {lab7};

Lab8:
begin;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Quantos pontos de calculo voce deseja?');
write('(max ',MaxNroPtos,') ');
read(NroPtos);
Indic:=false;Curva:=false;Tolerancia:=false;
goto Inicio;
end{lab8}

End{MudaParam};
{*****}

Procedure EscreveParam;

Var
  ans          :char;
  k1           :byte;

Begin;

```

```

if Param=false then exit;
clrscr;gotoxy(1,7);
writeln('Os parametros do filme devem ser apresentados:');
writeln;
writeln;
writeln('a) no video');
writeln;
writeln('b) na impressora');
gotoxy(20,24);
read(kbd,ans);
if ans in ['a','A']
then begin;
  clrscr;
  writeln('          PARAMETROS DO FILME');
  writeln;
  writeln('Nro.Camadas: ',NroCam:3);
  writeln;
  write('Angulo Incidencia:',AngInc*180/Pi:4:2);
  if anginc<>0 then writeln(' Polarizacao:',Pol:2)
    else writeln;
  writeln;
  writeln('Lambda Ref.:',LambPi*2/Pi:5:1,'nm');
  writeln('Lambda Ini.:',LambIn:5:1,'nm');
  writeln('Lambda Fin.:',LambFin:5:1,'nm');
  writeln;
  writeln('Nro.Pontos de Calculo:',NroPtos:3);
  writeln;
  writeln('Calculado  :',Calculado);
  writeln('Gravado    :',Gravado);
  writeln('Curva Ideal:',Curva);
  writeln('Tolerancia  :',Tolerancia);
  gotoxy(1,24);
  write('          (Para continuar tecle Return)          ');
  read(kbd,ans);
  clrscr;
  writeln('          Relacoes de dispersao:');
  writeln;
  writeln('           $n(\lambda)=a+b/\text{SQRT}(\lambda)$ ');
  writeln;
  For k1:=1 to NroRel
  Do writeln('Relacao ',k1,': a=',IndRefr[k1,-1]:4:3,' b=',IndRefr[k1,-2]:9);
  writeln;
  writeln('Design:');
  writeln;
  write('S=',Design[NroCam+1],' l');
  For k1:=1 to NroCam
  Do write(Design[NroCam+1-k1],' l');
  write(' ',Design[0],'=A');
  gotoxy(1,24);
  write('          (Para continuar tecle Return.)          ');
  read(kbd,ans);
  clrscr;
  writeln('Correcoes:');
  writeln;

```

```

For k1:=1 to NroCam
Do write(k1:3,':',Corr[NroCam+1-k1]:4:3,' ');
gotoxy(1,24);
write(' (Para voltar ao menu tecla Return) ');
read(kbd,ans);
end;
if ans in ['b','B']
then begin;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('Estou escrevendo os parametros');
  writeln('          na impressora. ');
  gotoxy(40,24);
  write(1st,#$0F);{codigo de controle para impressao reduzida}
  write(1st,' Nro.Cam.:',NroCam:2,' ');
  write(1st,' S=',Design[NroCam+1], ' ');
  For k1:=1 to NroCam
  Do write(1st,Design[NroCam+1-k1], ' ');
  writeln(1st,' ',Design[0], '=M');
  For k1:=1 to NroRel
  Do write(1st,' ',k1,':a=',IndRefr[k1,-1]:4:3,' b=',IndRefr[k1,-2]:9);
  writeln(1st);
  write(1st,' Correcoes: ');
  For k1:=1 to NroCam
  Do write(1st,k1:3,':',Corr[NroCam+1-k1]:6:5,' ');
  writeln(1st);
  write(1st,' Lambda Referencia: ',LambPi*2/PI:6:2,' nm ');
  write(1st,'Angulo Incidencia:',AngInc*180/PI:4:2);
  if anginc<>0 then write(1st,' Polarizacao:',Pol:2,' ');
  writeln(1st);
end;
End{EscreveParam};
{*****}

Procedure MontaTabela;

var
  ans,ans2                               :char;
  kInic,resto,FimPagina,k1,k2 :integer;
  inicio,fim                          :real;

Begin{ MontaTabela};
{Parte da procedure que le disp. de saida e limites da tabela}
if Calculado=false then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o comprimento de onda inicial para a tabela?');
writeln('(Deve ser maior ou igual a ',LambIn:6:2,' nm.)');
read(inicio);
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o comprimento de onda final para a tabela?');
writeln('(Deve ser menor ou igual a ',LambFin:6:2,' nm.)');
read(fim);
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('A tabela deve ser montada :');
writeln;

```

```

writeln('a) no video');
writeln('b) na impressora');
gotoxy(20,40);
read(kbd,ans);
{Fim da leitura de disp. de saida e limites}
passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
kInic:=Trunc((Inicio-LambIn)/passo/4)*4;
resto:=Round((NroPtos-INT((LambFin-Fim)/passo)-kInic)/4)*4;
If ans in ['a','A']
then Repeat
  clrscr;
  for k2:=1 to 37
  do write('-');
  gotoxy(1,2);
  writeln(' L(nm) R(Z) L(nm) R(Z)');
  for k2:=1 to 37
  do write('-');
  gotoxy(1,4);
  If resto>40 then FimPagina:=20
    else FimPagina:=resto div 2;
  resto:=resto-40;
  for k1:=kInic to kInic+FimPagina-1
  Do writeln(' ',LambIn+k1*passo:7:3,' ',100*Refl[k1]:7:4,
    ' ',LambIn+(k1+FimPagina)*passo:7:3,' ',100*Refl[k1+FimPagina]:7:4);
  gotoxy(1,24);
  write(' (Digite Return para continuar)');
  read(kbd,ans2);
  kInic:=kInic+40;
Until resto<=0;
if ans in ['b','B']
then begin{if b};
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('Estou imprimindo uma tabela.');
```

writeln;

writeln('            Aguarde um instante.');

gotoxy(40,24);

write(lst,##\$OF);{codigo para impressao reduzida}

Repeat

if resto>200

then FimPagina:=50

else FimPagina:=resto div 4;

resto:=resto-200;

write(lst,'            ');

For k1:=1 to 104

do write(lst,' \_');

writeln(lst);

write(lst,'            ');

for k1:=1 to 4

do write(lst,'| L(nm) | R(Z) |');

write(lst,##\$OD);{ \$OD=CR}

write(lst,'            ');

For k1:=1 to 104

do write(lst,' \_');

writeln(lst);

```

for k1:=kInic to kInic+FimPagina-1
do begin(for k1);
  write(lst,'          ');
  for k2:=0 to 3
  do begin(for k2);
    write(lst,'l ',LambIn+passo*(k2*FimPagina+k1):8:4);
    write(lst,' l ');
    write(lst,100*Refl[k1+k2*FimPagina]:7:4);
    write(lst,' l');
    end(for k2);
    writeln(lst);
  end(for k1);
  write(lst,'          ');
  for k1:=1 to 104
  do write(lst,'-');
  writeln(lst);
  if resto>0 then write(lst,^L){alimenta pagina na impressora}
  kinic:=kinic+200;
  Until resto<=0;
end(if b);
End(MontaTabela);
{*****}

```

```

Procedure TracaGrafico(var Refl:MatrRef1);

```

```

{Esta procedure traca um grafico em alta}
{resolucao a partir dos valores em Refl.}
{Necessita de uma resolucao de 640x200. }

```

```

const

```

```

  Xmax=600; {Valores das coordenadas maximas para o grafico}
  Ymax=180; {A tela deve ter mais 40 pixels em X e 20 em Y}

```

```

var

```

```

  ans                :char;
  Inicio,Fim,Max,Min,norma :real;
  k,kInic            :Integer;

```

```

Begin;

```

```

  If not calculado then exit;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  Writeln('Qual o compr. de onda inicial para o grafico?');
  writeln('Deve ser maior ou igual a ',LambIn:6:2,'nm');
  Read(Inicio);
  If Inicio<LambIn then exit;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  Writeln('Qual o compr. de onda final para o grafico?');
  Writeln('Deve ser menor ou igual a ',LambFin:6:2,'nm');
  read(Fim);
  If LambFin<Fim then exit;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
  kinic:=Round((Inicio-LambIn)/passo);
  norma:=Xmax/((Fim-Inicio)/passo);

```

```

write('Voce deseja um grafico de refletividade ou transmissao? (r/t) ');
read(kbd,ans);
if ans in ['r','R']
then begin;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  write('Qual a refletividade percentual minima para o grafico? ');
  read(min);
  clrscr;gotoxy(1,10);
  write('Qual a refletividade percentual maxima para o grafico? ');
  read(max);
  TextMode(BW80); {Serve para escrever certo na tela}
  HiRes; {Comando para entrar em modo grafico}
  If norma>1
  Then For k:=0 to Round((Fim-Inicio)/passo-1)
    do draw(Round(k*norma+28),
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*(Refl[k*norma]-min/100)/(Max-min)),
            Round((k+1)*norma+28),
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*(Refl[k*norma+1]-min/100)/(Max-min)),1)
  Else begin;
    norma:=1/norma;
    For k:=0 to Xmax-1
    do draw(k+28,
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*(Refl[k*norma]-min/100)/(Max-min)),
            k+29,
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*(Refl[k*norma+1]-min/100)/(Max-min)),1);
    end;
  Gotoxy(1,13);Write('R Z');
end{then if ans in ['r','R']}
else begin:{ans in ['t','T']}
  clrscr;gotoxy(1,10);
  write('Qual a transmissao percentual minima para o grafico? ');
  read(min);
  clrscr;gotoxy(1,10);
  write('Qual a transmissao percentual maxima para o grafico? ');
  read(max);
  TextMode(bw80); {Ver observ. anteriores}
  HiRes;
  If norma>1
  then For k:=0 to Round((Fim-Inicio)/passo-1)
    do Draw(Round(k*norma+28),
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*((1-refl[k*norma]-min/100)/(max-min)),
            Round((k+1)*norma+28),
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*((1-refl[k*norma+1]-min/100)/(max-min)),1)
  else begin;
    For k:=0 to Xmax-1
    do Draw(k+28,
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*((1-refl[k*norma]-min/100)/(max-min)),
            k+29,
            Round(Ymax+6-100.0*Ymax*((1-refl[k*norma+1]-min/100)/(max-min)),1);
    end;
  Gotoxy(1,13);Write('T Z');
end{if ans}
Gotoxy(1,2);write(Max:3:0);
Gotoxy(1,24);write(Min:3:0);

```

```

Gotoxy(30,25);Write('comprimento de onda (nm)');
Gotoxy(4,25);write(Inicio:5:1);
Gotoxy(75,25);write(Fim:5:1);
Draw(27,5,27,Ymax+7,1);draw(27,Ymax+7,Xmax+29,Ymax+7,1);
Draw(Xmax+29,Ymax+7,Xmax+29,5,1);Draw(Xmax+29,5,27,5,1);
For k:=0 to 10 do begin;
    Plot(Round(28+k*(Xmax/10)),Ymax+8,1);
    Plot(26,Round(6+k*(Ymax/10)),1);
    Plot(Round(28+k*(Xmax/10)),4,1);
    Plot(Xmax+30,Round(6+k*(Ymax/10)),1);
end;
Plot(28,Ymax+9,1);Plot(Xmax+28,Ymax+9,1);plot(Xmax+28,Ymax+9,1);
Plot(28,3,1);Plot((Xmax div 2)+28,3,1);plot(Xmax+28,3,1);
Plot(25,6,1);plot(25,(Ymax div 2)+6,1);plot(25,Ymax+6,1);
Plot(Xmax+31,6,1);plot(Xmax+31,(Ymax div 2)+6,1);plot(Xmax+31,Ymax+6,1);
read(kbd,ans);
if ans in ['p','P'] then HardCopy(false,1); {HardCopy e um utilitario }
TextMode(0); {que imprime a tela graf.}
End(TracaGrafico);
{*****}

Procedure GravaArquivo;

{Esta procedure grava um arquivo com }
{os dados e resultados para um dado fil}
{me. }

var
    ans          : char;
    k            : integer;
    ArqDados     : text ;
    NomeArq     : string[65];

Begin;
if Calculado=false then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o nome do arquivo para gravacao ');
writeln('dos dados? ');
writeln;
readln(NomeArq);
clrscr;gotoxy(1,10);
NomeArq:=NomeArq+'.DTF';
Assign(ArqDados,NomeArq);
{$I-} Reset(ArqDados); {$I+}
If IOResult=0
then begin;
    writeln(NomeArq,' ja existe neste disco. ');
    writeln;
    write('Voce deseja gravar o arquivo com este nome? (s/n) ');
    read(kbd,ans);
    if ans in ['n','N'] then begin;
        close(ArqDados);
        exit;
    end;
end;

```

```

                                end;
        clrscr;gotoxy(1,10);
        end;
        writeln(' Estou gravando o arquivo. ');
        writeln;
        write('          Aguarde um instante. ');
        gotoxy(40,24);
        Rewrite(ArqDados);
        writeln(ArqDados,NroCam);
        writeln(ArqDados,NroRel);
        for k:=1 to NroRel
        do begin;
            writeln(ArqDados,IndRefr[k,-1]:16);
            writeln(ArqDados,IndRefr[k,-2]:16);
            writeln(ArqDados,IndRefr[k,-3]:16);
            writeln(ArqDados,IndRefr[k,-4]:16);
        end;
        For k:=0 to NroCam+1
        do writeln(ArqDados,Design[k]);
        For k:=1 to NroCam
        do writeln(ArqDados,Corr[k]:16);
        writeln(ArqDados,LambPi*2/PI:16);
        writeln(ArqDados,LambIn:16);
        writeln(ArqDados,LambFin:16);
        writeln(ArqDados,AngInc*180/PI:16);
        writeln(ArqDados,Pol);
        writeln(ArqDados,NroPtos);
        For k:=0 to NroPtos-1
        do writeln(ArqDados,Refl[k]:16);
        close(ArqDados);
        Gravado:=True;
        End{GravaArquivo};
        {*****}

Procedure LeArquivo;

{Esta procedure le um arquivo com }
{os dados e resultados para um dado fil}
{we.                               }

var
    k           : integer;
    ArqDados    : text ;
    NomeArq     : string[65];
    ans         : char;

Begin;
if (Calculado=true) and (Gravado=false)
then begin;
    clrscr;gotoxy(1,10);
    writeln('Voce nao deseja salvar antes o filme');
    write('atual? (s/n) ');
    read(kbd,ans);

```

```

    if ans in ['s','S'] then exit;
    end;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o nome do arquivo para ler? ');
writeln;
read(NomeArq);
clrscr;gotoxy(1,10);
NomeArq:=NomeArq+'.DTF';
Assign(ArqDados,NomeArq);
{$I-} Reset(ArqDados); {$I+}
If IOResult(<)0
then begin;
    write(NomeArq,' nao existe no disco atual. ');
    gotoxy(1,24);
    write(' (Tecla Return para voltar ao Menu) ');
    read(kbd,ans);
    exit;
    end;
writeln(' Estou lendo o arquivo. ');
writeln;
write('     Aguarde um instante. ');
gotoxy(40,24);
readln(ArqDados,NroCam);
readln(ArqDados,NroRel);
For k:=1 to NroRel
Do begin;
    readln(ArqDados,IndRefr[k,-1]);
    readln(ArqDados,IndRefr[k,-2]);
    readln(ArqDados,IndRefr[k,-3]);
    readln(ArqDados,IndRefr[k,-4]);
    end;
For k:=0 to NroCam+1
do readln(ArqDados,Design[k]);
For k:=1 to NroCam
do readln(ArqDados,Corr[k]);
readln(ArqDados,LambPi);LambPi:=LambPi*PI/2;
readln(ArqDados,LambIn);
readln(ArqDados,LambFin);
readln(ArqDados,AngInc);AngInc:=AngInc*PI/180;
readln(ArqDados,Pol);
readln(ArqDados,NroPtos);
For k:=0 to NroPtos
do readln(ArqDados,Ref1[k]);
close(ArqDados);
Param:=true;Calculado:=true;Gravado:=True;Indic:=false;Curva:=false;
Tolerancia:=false;
End(LeArquivo);
{*****}

```

Procedure EntraTolerancia;

```

{Esta procedure possibilita a entrada }
{de uma curva para a tolerancia utili }
{zada no calculo da funcao de merito }

```

```

{a partir do teclado ou de uma arqui }
{vo em disco.                }

Var
  ans                :char;
  k                  :Integer;
  a,b,Lamb1,Lamb2,Tol1,Tol2 :real;
  ArqDados           :text;
  NomeArq            :string[12];

Begin;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('Voce deseja entrar com a curva para a');
  writeln('tolerancia a partir:');
  writeln;
  writeln;
  writeln('a)do teclado');
  writeln;
  writeln('b)de um arquivo em disco');
  gotoxy(20,24);
  read(kbd,ans);
  if ans in ['a','A']
  then begin;
    clrscr;
    passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
    writeln('LambdaInicial : ',LambIn:6:2,'nm');
    writeln('LambdaFinal   : ',LambFin:6:2,'nm');
    writeln;
    writeln('Introduza os compr.de onda e tolerancias');
    writeln;
    Lamb1:=LambIn;
    write('Lambda(nm):',LambIn:4:0,' Tol(Z): ');
    readln(Tol1);
    Repeat
      write('Lambda(nm): ');read(Lamb2);
      write(' Tol(Z): ');readln(Tol2);
      if Lamb2=Lamb1 then Lamb1:=Lamb1+passo;
      a:=(Tol2-Tol1)/(Lamb2-Lamb1)*passo/100;
      b:=((Tol2-Tol1)/(Lamb2-Lamb1)*(LambIn-Lamb1)+Tol1)/100;
      For k:=Trunc((Lamb1-LambIn)/passo) to NroPtos-Trunc((LambFin-Lamb2)/passo)
        Do Tol[k]:=a*k+b;
      Lamb1:=Lamb2;Tol1:=Tol2;
    Until Lamb2>=LambFin;
    Tolerancia:=true;
    exit;
  end{if in ['a','A']};
  If ans in ['b','B']
  then begin;
    clrscr;gotoxy(1,10);
    write('Entre com o nome do arquivo: ');
    read(NomeArq);
    clrscr;gotoxy(1,10);
    NomeArq:=NomeArq+'.TOL';
    Assign(ArqDados,NomeArq);
  end;
end;

```

```

{$I-} Reset(ArqDados); {$I+}
If IOResult<>0
then begin;
    write(NomeArq, ' nao existe no disco atual. ');
    gotoxy(1,24);
    write(' (Tecla Return para continuar) ');
    Read(kbd,ans);
    exit;
end;
readln(ArqDados,k);
if k<>HroPtos then begin;
    close(ArqDados);
    clrscr;gotoxy(1,10);
    writeln('O arquivo nao tem o numero de pontos de calculo adequado. ');
    gotoxy(1,24);
    write(' (Tecla Return para continuar) ');
    read(kbd,ans);
    exit;
end;
writeln('Estou lendo o arquivo. ');
writeln;
writeln(' Aguarde um instante ');
gotoxy(40,24);
For k:=0 to HroPtos-1
Do Readln(ArqDados,Tol[k]);
Close(ArqDados);
Tolerancia:=true;
exit;
end;
End;(EntraTolerancia)
{*****}

Procedure GravaTolerancia;

{Esta procedure grava os valores de uma}
{curva idealizada de refletividade no }
{disco. }

Var
    ans          :char;
    k            :integer;
    ArqDados     :text;
    NomeArq      :string[12];

begin;
if Tolerancia=false then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
write('Entre com o nome do arquivo: ');
read(NomeArq);
NomeArq:=NomeArq+'.TDL';
clrscr;gotoxy(1,10);
Assign(ArqDados,NomeArq);
{$I-} Reset(ArqDados); {$I+}
If IOResult=0

```

```

then begin;
  write(HomeArq,' ja existe no disco atual. ');
  writeln;
  Write('Voce deseja gravar o arquivo com este nome? (s/n) ');
  read(kbd,ans);
  if ans in ['n','N'] then begin;
    close(ArqDados);
    exit;
    end;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  end;
writeln('Estou gravando o arquivo. ');
writeln;
writeln('      Aguarde um instante ');
gotoxy(40,24);
Rewrite(ArqDados);
writeln(ArqDados,NroPtos);
For k:=0 to NroPtos-1
Do WriteLn(ArqDados,Tol[k]:16);
Close(ArqDados);
End;{GravaTolerancia}
{*****}

```

Procedure MudaPotMerito;

```

var
  ans:char;

begin;
  clrscr;gotoxy(1,5);
  writeln('Voce deseja qual potencia:');
  writeln;
  writeln;
  writeln(' a) 1');
  writeln;
  writeln(' b) 2');
  writeln;
  writeln(' c) 4');
  writeln;
  writeln(' d) 16');
  gotoxy(20,24);
  read(kbd,ans);
  case ans of
    'a':kMerito:=1;
    'b':kMerito:=2;
    'c':kMerito:=4;
    'd':kMerito:=16;
  end;
  potencia:=true;
  end;{MudaPotMerito}
{*****}

```

Procedure MenuMerito;

```

var
  ans:char;

begin;
  Repeat
  clrscr;
  writeln('      PROGRAMA FILMREFL');
  gotoxy(1,5);
  writeln(' Voce deseja:');
  writeln;
  writeln;
  writeln;
  writeln('a)Entrar com uma curva de tolerancia. ');
  writeln;
  writeln('b)Gravar uma curva de tolerancia. ');
  writeln;
  writeln('c)Alterar a potencia da f.de merito. ');
  writeln;
  writeln('d)Tracar um grafico da tolerancia. ');
  writeln;
  writeln('e)Voltar ao menu de otimizacao. ');
  gotoxy(20,24);
  read(kbd,ans);
  case Upcase(ans) of
    'A':EntraTolerancia;
    'B':GravaTolerancia;
    'C':TracaGrafico(Tol);
    'D':MudaPotMerito;
    end;
  Until Upcase(ans)='E';
end;(MenuMerito)
{*****}

Function Merito:real;

{Calcula a funcao de merito }

Var
  k          :integer;
  ResultParcial  :real;

begin;
  ResultParcial:=0;
  For k:=0 to NroPtos-1
  Do ResultParcial:=ResultParcial
    +exp(kMerito*ln(Abs(RefIIdeal[k]-RefI[k])/Tol[k]));
  ResultParcial:=exp(ln(ResultParcial/NroPtos)/kMerito);
  Merito:=ResultParcial;
  end(Merito);
{*****}

Procedure EntraCurva;

{Esta procedure possibilita a entrada }

```

```
{de uma curva idealizada de refletivida}
{de a partir do teclado ou de uma arqui}
{vo em disco. }
```

```
Var
  ans                :char;
  k                  :Integer;
  a,b,Lamb1,Lamb2,Ref11,Ref12 :real;
  ArqDados           :text;
  NomeArq            :string[12];
```

```
Begin;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('Voce deseja entrar com a curva a partir:');
  writeln;
  writeln;
  writeln('a)do teclado');
  writeln;
  writeln('b)de um arquivo em disco');
  gotoxy(20,24);
  read(kbd,ans);
  if ans in ['a','A']
  then begin;
    clrscr;
    passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
    writeln('LambdaInicial : ',LambIn:6:2,'nm');
    writeln('LambdaFinal   : ',LambFin:6:2,'nm');
    writeln;
    writeln('Introduza os compr.de onda e refl. ');
    writeln;
    Lamb1:=LambIn;
    write('Lambda(nm):',LambIn:4:0,' Refl(Z): ');
    readln(Ref11);
    Repeat
      write('Lambda(nm): ');read(Lamb2);
      write(' Refl(Z): ');readln(Ref12);
      if Lamb2=Lamb1 then Lamb1:=Lamb1+passo;
      a:=(Ref12-Ref11)/(Lamb2-Lamb1)*passo/100;
      b:=((Ref12-Ref11)/(Lamb2-Lamb1)*((LambIn-Lamb1)+Ref11)/100;
      For k:=Trunc((Lamb1-LambIn)/passo) to NroPtos-Trunc((LambFin-Lamb2)/passo)
      Do ReflIdeal[k]:=a*k+b;
      Lamb1:=Lamb2;Ref11:=Ref12;
    Until Lamb2>=LambFin;
    curva:=true;
    exit;
  end{if in ['a','A']};
  If ans in ['b','B']
  then begin;
    clrscr;gotoxy(1,10);
    write('Entre com o nome do arquivo: ');
    read(NomeArq);
    clrscr;gotoxy(1,10);
    NomeArq:=NomeArq+'.SHP';
    Assign(ArqDados,NomeArq);
```

```

{$I-} Reset(ArqDados); {$I+}
If IOResult<>0
then begin;
  write(NomeArq, ' nao existe no disco atual. ');
  gotoxy(1,24);
  write(' (Tecla Return para continuar) ');
  Read(kbd,ans);
  exit;
end;
readln(ArqDados,k);
if k<>HroPtos then begin;
  close(ArqDados);
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('O arquivo nao tem o numero de pontos de calculo adequado. ');
  gotoxy(1,24);
  write(' (Tecla Return para continuar) ');
  read(kbd,ans);
  exit;
end;

writeln('Estou lendo o arquivo. ');
writeln;
writeln(' Aguarde um instante ');
gotoxy(40,24);
For k:=0 to HroPtos-1
Do Readln(ArqDados,ReflIdeal[k]);
Close(ArqDados);
Curva:=true;
exit;
end;
End(EntraCurva);
{*****}

Procedure GravaCurva;

{Esta procedure grava os valores de uma}
{curva idealizada de refletividade no }
{disco. }

Var
  ans          :char;
  k            :integer;
  ArqDados     :text;
  NomeArq      :string[12];

begin;
if Curva=false then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
write('Entre com o nome do arquivo: ');
read(NomeArq);
NomeArq:=NomeArq+'.SHP';
clrscr;gotoxy(1,10);
Assign(ArqDados,NomeArq);
{$I-} Reset(ArqDados); {$I+}
If IOResult=0

```

```

then begin;
  write(NomeArq,' ja existe no disco atual. ');
  writeln;
  Write('Voce deseja gravar o arquivo com este nome? (s/n) ');
  read(kbd,ans);
  if ans in ['n','N'] then begin;
    close(ArqDados);
    exit;
    end;

  clrscr;gotoxy(1,10);
  end;
writeln('Estou gravando o arquivo. ');
writeln;
writeln('          Aguarde um instante ');
gotoxy(40,24);
Rewrite(ArqDados);
writeln(ArqDados,NroPtos);
For k:=0 to NroPtos-1
Do Writeln(ArqDados,ReflIdeal[k]:16);
Close(ArqDados);
End(GravaCurva);
{*****}

Procedure CalculaMerito;

{Calcula a funcao Merito deste que exis}
{ta a curva idealizada e esteja calcula}
{do o atual design.                }

Var
  k          :integer;
  Merit      :real;
  Ans        :char;

Begin;
If (Calculado=false) or (Curva=false) then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
write('Estou calculando. ');
gotoxy(40,24);
passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
If not Potencia then kMerito:=1;
If not Tolerancia
then For k:=1 to NroPtos
  Do Tol[k]:=1;
Merit:=Merit;
clrscr;gotoxy(1,10);
Writeln('Valor da funcao merito: ',Merit:11);
Writeln;
Writeln('Imprimir este valor? ');
Write('(s/n) ');
read(kbd,ans);
If ans in ['s','S'] then Writeln(1st,' Merito= ',Merit:11);
End;(CalculaMerito)
{*****}

```

Procedure OtimizaFilme;

```
{Esta procedure varia os valores das }
{correcoes de cada camada de forma a }
{minimizar a diferenca entre a curva }
{calculada para um design de filme e }
{a curva idealizada }
}
```

Var

```
k,k1,k2,kinic,kFinal,NroInt :integer;
Corr1,Corr2,CorrMin,CorrMax,CorrIn,CorrFin,DivInt,Merit1,Merit2 :real;
ans :char;
```

Begin;

```
if curva=false then exit;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual e o valor inicial do intervalo de');
write('variacao das espessuras? ');
read(CorrIn);
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual o valor final do intervalo de');
write('variacao das espessuras? ');
read(CorrFin);
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Quantas iteracoes para cada camada ');
write('deve ser feitas para minimizar a funcao');
write('de merito? ');
read(NroInt);
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Por qual camada deve ser iniciada a');
write('otimizacao? ');
read(kinic);
kFinal:=NroCam;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Qual a ultima camada a ser otimizada?');
read(kFinal);
passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
if Indic=false then CalculaIndices;
clrscr;gotoxy(1,10);
writeln('Estou otimizando o filme. ');
writeln;
writeln('          Vai levar alguma tempo. ');
gotoxy(40,24);
If potencia=false then kMerito:=1;
If Tolerancia=false then For k:=1 to NroPtos
Do Tol[k]:=1;
DivInt:=(Sqrt(5)-1)/2;
If kFinal<kInic
Then begin;
For k1:=kInic Downto kFinal{loop que varia a camada}
Do begin;
CorrMin:=CorrIn;CorrMax:=CorrFin;
Corr2:=CorrMin+DivInt*(CorrMax-CorrMin);
```

```

Corr[NroCam+1-k1]:=Corr2;
CalculaRefletividade;
Merit2:=Merit0;
Corr1:=CorrMin+CorrMax-Corr2;
Corr[NroCam+1-k1]:=Corr1;
For k2:=1 to NroInt(loop que controla o nro. de iteracoes)
Do begin;
  CalculaRefletividade;
  If Corr1=Corr[NroCam+1-k1] then Merit1:=Merit0
    else Merit2:=Merit0;
  If Merit1<Merit2 then begin;
    CorrMax:=Corr2;
    Merit2:=Merit1;
    Corr2:=Corr1;
    Corr1:=CorrMin+CorrMax-Corr2;
    Corr[NroCam+1-k1]:=Corr1;
  end
  else begin;
    CorrMin:=Corr1;
    Merit1:=Merit2;
    Corr1:=Corr2;
    Corr2:=Corr1+Corr1-CorrMin;
    Corr[NroCam+1-k1]:=Corr2;
  end;
end;(for k2)
Corr[NroCam+1-k1]:=(Corr1+Corr2)/2;
end;(for k1)
end(Then If kFinal<kInic)
Else begin;
For k1:=kInic to kFinal(loop que varia a camada)
Do begin;
  CorrMin:=CorrIn;CorrMax:=CorrFin;
  Corr2:=CorrMin+DivInt*(CorrMax-CorrMin);
  Corr[NroCam+1-k1]:=Corr2;
  CalculaRefletividade;
  Merit2:=Merit0;
  Corr1:=CorrMin+CorrMax-Corr2;
  Corr[NroCam+1-k1]:=Corr1;
  For k2:=1 to NroInt(loop que controla o nro. de iteracoes)
Do begin;
  CalculaRefletividade;
  If Corr1=Corr[NroCam+1-k1] then Merit1:=Merit0
    else Merit2:=Merit0;
  If Merit1<Merit2 then begin;
    CorrMax:=Corr2;
    Merit2:=Merit1;
    Corr2:=Corr1;
    Corr1:=CorrMin+CorrMax-Corr2;
    Corr[NroCam+1-k1]:=Corr1;
  end
  else begin;
    CorrMin:=Corr1;
    Merit1:=Merit2;
    Corr1:=Corr2;

```

```

Corr2:=Corr1+Corr1-CorrMin;
Corr[NroCam+1-k1]:=Corr2;
end;

end;(for k2)
Corr[NroCam+1-k1]:=(Corr1+Corr2)/2;
end;(for k1)
end;(Else If kFinal<kInic)
CalculaRefletividade;
Calculado:=true;
Gravado:=false;
ClrScr;gotoxy(1,10);
If Merit2<Merit1 then Merit1:=Merit2;
writeln('Valor da funcao de merito: ',Merit1:11);
gotoxy(1,24);
write(' (Para continuar tecle Return) ');
read(kbd,ans);
If ans in ['p','P'] then writeln(1st,'Merito= ',Merit1:11);
End(OtimizaFilme);
{*****}

Procedure OtimMetGrad;

Var
  CorrIn,CorrFin :real;
  delta,Precisao,NormaGrad,divDelta,divStep :real;
  gradMeritoMax,Merit01,Merit02 :real;
  NroStep,NroInt,DirMaxVar :integer;
  gradMerito,CorrBackUp :MatrCorr;
  DivInt :real;
  k,k1,k2 :integer;
  Step,Step1,Step2,StepMin,StepMax :real;
  ans :char;
  CorrOut,trace,Merit01Menor :boolean;

Begin;
If not curva then exit;
ClrScr;Gotoxy(1,10);
Writeln('Qual e o valor inicial do intervalo');
Write('de variacao das espessuras? ');
Read(CorrIn);
ClrScr;Gotoxy(1,10);
Writeln('Qual e o valor final do intervalo de');
Write('variacao das espessuras? ');
Read(CorrFin);
ClrScr;Gotoxy(1,10);
Writeln('Quantas vezes menor que o intervalo de');
Writeln('variacao de espessuras deve ser o');
Write('vetor inicial de busca? ');
Read(divStep);
ClrScr;Gotoxy(1,10);
Writeln('Quantas vezes menor que o vetor de');
Writeln('busca deve ser a variacao da espessura');
Write('para o calculo do gradiente? ');
Read(divDelta);

```

```

ClrScr;gotoxy(1,10);
Write('Qual o numero de iteracoes? ');
Read(NroInt);
ClrScr;Gotoxy(1,10);
WriteIn('Qual e o valor da funcao de merito');
Write('que deve ser atingido? ');
Read(Precisao);
ClrScr;Gotoxy(1,10);
WriteIn('Voce deseja uma saida na impressora ');
Write('dos resultados parciais? (s/n) ');
Read(kbd,ans);
If ans in ['s','S'] then trace:=true
    else trace:=false;

DivInt:=(Sqrt(5)-1)/2;
Step:=(CorrFin-CorrIn)/divStep;
passo:=(LambFin-LambIn)/(NroPtos-1);
if trace then begin;
    Write(1st.#$OF);
    WriteIn(1st,' Merito Mod.VetorDeBusca MaiorComp.Grad.',
        ' ValorComp.Grad. MaiorVar.Espess. NormaGrad.');
```

end;

```

If not Indic then CalculaIndices;
ClrScr;Gotoxy(1,10);
WriteIn('Estou otimizando o filme.');
```

WriteIn(' Vai levar muito tempo.');

```

gotoxy(40,24);
If potencia=false then kMerito:=1;
If Tolerancia=false then For k:=1 to NroPtos
    Do Tol[k]:=1;

For k:=1 to NroCam
Do CorrBackUp[k]:=Corr[k];
{Loop 1}
Repeat
delta:=step/divDelta;
{Calcula gradiente de Merito}
For k:=1 to NroCam
Do Corr[k]:=CorrBackUp[k];
CalculaRefletividade;
Merito1:=Merito;
For k:=1 to NroCam
Do begin;
    Corr[k]:=Corr[k]+delta;
    CalculaRefletividade;
    Merito2:=Merito;
    gradMerito[k]:=(Merito2-Merito1)/delta;
    Corr[k]:=Corr[k]-delta;
end;
{Normaliza gradiente de Merito}
NormaGrad:=0;
For k:=1 to NroCam
Do NormaGrad:=NormaGrad+Sqr(gradMerito[k]);
NormaGrad:=Sqr(NormaGrad);
For k:=1 to NroCam
```

```

Do gradMerito[k]:=gradMerito[k]/NormaGrad;
NroStep:=0;
CorrOut:=false;
Merito2:=Merito1;
{Loop 2}
Repeat
if CorrOut then begin;
    Step:=Step/2;
    CorrOut:=false;
end
else begin;
    Merito1:=Merito2;
    NroStep:=NroStep+1;
end;
For k:=1 to NroCam
Do begin;
    Corr[k]:=CorrBackUp[k]-NroStep*Step*gradMerito[k];
    if (Corr[k]<CorrIn) or (Corr[k]>CorrFin)
    then CorrOut:=true;
end;
CalculaRefletividade;
Merito2:=Merito;
Until ((Merito2>Merito1) and ((not CorrOut) or (NroStep>1)))
or (CorrOut and (NroStep>1));
If CorrOut then NroStep:=NroStep-1;

{Pesquisa melhor Step por Golden Section}
If NroStep=1 then begin;
    StepMin:=0;
    StepMax:=Step;
end
else begin;
    StepMin:=(NroStep-2)*Step;
    StepMax:=NroStep*Step;
end;
Step2:=StepMin+DivInt*(StepMax-StepMin);
For k:=1 to NroCam
Do Corr[k]:=CorrBackUp[k]-Step2*gradMerito[k];
CalculaRefletividade;
Merito2:=Merito;
Step1:=StepMin+StepMax-Step2;
For k:=1 to NroCam
Do Corr[k]:=CorrBackUp[k]-Step1*gradMerito[k];
Merito1Menor:=true;
For k2:=1 to NroInt{loop que controla o nro. de iteracoes}
Do begin;
    CalculaRefletividade;
    If Merito1Menor
    then Merito1:=Merito
    else Merito2:=Merito;
    If Merito1<Merito2 then begin;
        Merito1Menor:=true;
        StepMax:=Step2;
        Merito2:=Merito1;
    end;
end;

```

```

        Step2:=Step1;
        Step1:=StepMin+StepMax-Step2;
        For k:=1 to NroCam
            Do Corr[k]:=CorrBackUp[k]-Step1*gradMerito[k];
        end
    else begin;
        Merito1Menor:=false;
        StepMin:=Step1;
        Merito1:=Merito2;
        Step1:=Step2;
        Step2:=Step1+Step1-StepMin;
        For k:=1 to NroCam
            Do Corr[k]:=CorrBackUp[k]-Step2*gradMerito[k];
        end;
    end;{for k2}
Step:=(StepMin+StepMax)/2*0.9;
For k:=1 to NroCam
Do CorrBackUp[k]:=CorrBackUp[k]-Step*gradMerito[k];
If trace
then begin;
    gradMeritoMax:=0;
    For k:=1 to NroCam
    Do if abs(gradMeritoMax)<abs(gradMerito[k])
        then begin;
            gradMeritoMax:=gradMerito[k];
            DirMaxVar:=k;
        end;
    if Merito2<Merito1 then Merito1:=Merito2;
    WriteLn(1st,Merito1,Step,' ',
    DirMaxVar,' ',gradMeritoMax,Step*gradMeritoMax,NorwaGrad);
    For k:=1 to NroCam
    Do Write(1st,k:3,'.',Corr[NroCam+1-k]:6:5,' ');
    writeLn(1st);
    end;
Step:=Step/2;
Until (Merito1<Precisao) or KeyPressed;

For k:=1 to NroCam
Do Corr[k]:=CorrBackUp[k];
CalculaRefletividade;
Calculado:=true;gravado:=false;
ClrScr;gotoxy(1,10);
WriteLn('Filme Otimizado!');
WriteLn;
Write('      Merito= ',Merito1);
gotoxy(1,24);
WriteLn('      (Para continuar tecle Return)');
Read(kbd,ans);
End;{OtimMetGrad}
{*****}

Procedure MenuOtim;

(Esta procedure apresenta um menu de )

```

```
{opcoes relacionadas a otimizacao de }
{um filme e chama a subrotina relaci }
{nada com a opcao escolhida. }
}
```

```
Var
  ans          :char;
```

```
Label
  Inicio;
```

```
Begin;
  if Param=false then exit;
  Inicio:
    begin;
      clrscr;
      writeln('          PROGRAMA FILMREFL');
      gotoxy(1,5);
      writeln('  Voce deseja:');
      writeln;
      writeln;
      writeln('a)Entrar com a curva de R desejada.');
```

```
writeln;
writeln('b)Gravar arquivo com a curva desejada.');
```

```
writeln;
writeln('c)Tracar um grafico desta curva.');
```

```
writeln;
writeln('d)Calc.a f.de merito do design atual.');
```

```
writeln;
writeln('e)Modificar f. de merito e toler.');
```

```
writeln;
writeln('f)Otimizar o filme: metodo simples.');
```

```
writeln;
writeln('g)Otimizar o filme: met. do gradiente.');
```

```
writeln;
writeln('h)Voltar ao menu principal.');
```

```
gotoxy(20,24);
```

```
read(kbd,ans);
```

```
Case ans of
```

```
  'a':EntraCurva;
```

```
  'b':GravaCurva;
```

```
  'c':TracaGrafico(ReflIdeal);
```

```
  'd':CalculaMerito;
```

```
  'e':MenuMerito;
```

```
  'f':OtimizaFilme;
```

```
  'g':OtimMetGrad;
```

```
  'h':Exit
```

```
end(case);
```

```
end(label Inicio);
```

```
Goto Inicio;
```

```
End(MenuOtimiza);
```

```
{*****}
```

```
Procedure Saida;
```

```
{Esta procedure finaliza a utilizacao }
{do programa, passando o controle de }
{volta ao sistema operacional.      }
```

```
var
  ans           :char;
```

```
Begin;
if (calculado=true)and(gravado=false)
then begin;
  clrscr;gotoxy(1,10);
  writeln('Voce deseja gravar um arquivo com os ');
  writeln('dados calculados antes de voltar ao ');
  write('sistema operacional? (s/n) ');
  read(ans);
  If ans in ['s','S'] then exit;
  end;
TextMode(2);
Halt;
End(Saida);
{*****}
```

```
BEGIN
Inicializacao;
INICIO:
  Begin;
  Menu;
  Case Opcao of
    'a':LeParam;
    'b':MudaParam;
    'c':EscreveParam;
    'd':CalculaFilae;
    'e':MontaLabela;
    'f':TracaGrafico(Ref1);
    'g':GravaArquivo;
    'h':LeArquivo;
    'i':MenuOtim;
    'j':Saida;
  end;(Fim do case)
  End(label Inicio);
  Goto Inicio;
END(do Programa).
{*****}
```

## APÊNDICE B: DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE UMA MONOCAMADA

Discutiremos aqui, a determinação da espessura de uma monocamada de material dielétrico não absorvente, através da medida do espectro de transmissão. Uma discussão similar a nossa, para filmes absorventes, pode ser encontrada em (Pelletier 1976).

A partir da medida da transmissão  $T_0$  de um filme junto com o substrato, em relação ao substrato sem nenhum recobrimento, é possível obter a transmissão  $T$  do filme através da seguinte equação (Bennett 1967, 43), se consideramos o filme e o substrato não absorventes:

$$T = \frac{1-R_s}{1+R_s(1-T_0)} T_0 \quad (B-1)$$

onde  $R_s$  é o fator de reflexão do substrato, que pode ser

obtido através da equação:

$$R_s = \frac{(n_s - 1)^2}{(n_s + 1)^2} \quad (B-2)$$

O fator de reflexão do filme é relacionado com o de transmissão pela equação 1-34 da secção 1.1.4. Se consideramos a absorção do filme nula, temos que:

$$R = 1 - T \quad (B-3)$$

A suposição de que os filmes não são absorventes é razoável no intervalo de comprimentos de onda em que utilizamos os dois materiais com que construímos nossos filmes. O ZnS é não absorvente para comprimentos de onda acima de 0.42  $\mu\text{m}$  (Hall 1955) e o  $\text{MgF}_2$  de 0.2 a 5  $\mu\text{m}$  (Hass 1967).

A partir do valor máximo do fator de reflexão, obtém-se o índice de refração utilizando-se (Abeles 1963):

$$n^2 = n_o n_s \frac{1 + (R_n)^{1/2}}{1 - (R_n)^{1/2}} \quad (B-4)$$

Nós utilizamos as seguintes relações de dispersão:

$$n = 1.380 + 2022 / (\lambda)^2 \quad (B-5)$$

para o  $\text{MgF}_2$  e:

$$n = 2.169 + 57854 / (\lambda)^2 \quad (B-6)$$

Para o ZnS. Estas equações estão em boa concordância com os resultados obtidos em (Pelletier 1976).

Para uma dada monocamada, sendo conhecida a dispersão e o valor do comprimento de onda  $\lambda_m$  para o qual existe um máximo ou mínimo de intensidade do fator de reflexão, é possível determinar sua espessura através da seguinte equação (Heavens 1964):

$$\frac{dR_r}{d\sigma} = \frac{8n_o n_1 n_B \tan\beta \csc^2\beta}{[n_1^2 (n_o + n_B)^2 + (n_o n_B + n_1^2)^2 \tan^2\beta]} \left[ (n_1^4 - n_o^2 n_B^2) \tan\beta \frac{dn_1}{d\sigma} + (n_1^2 - n_B^2)(n_1^2 - n_o^2) \beta \left( \frac{dn_1}{d\sigma} + \frac{n_1}{\sigma_m} \right) \right] \quad (B-7)$$

onde:

$$\beta = 2\pi n_1 d_1 / \lambda_m \quad (B-8)$$

e  $\sigma = 1/\lambda$ ,  $\sigma_m = 1/\lambda_m$ . A derivada  $dn_1/d\sigma$  deve ser avaliada para  $\lambda_m$ . No caso, como estamos utilizando uma relação de dispersão da forma de equação 1-49, temos que:

$$\frac{dn_1}{d\sigma} = 2b\sigma \quad (B-9)$$

Encontrando a raiz da equação B-7 em relação a  $\beta$  e

utilizando a equação B-8, determina-se a espessura da camada. Convém salientar que a equação B-7 representa uma função cíclica, possuindo uma série de raízes, sendo necessário conhecer a ordem do máximo do fator de reflexão para determinar qual raiz é a adequada.

## BIBLIOGRAFIA

- Abeles, F. Recherches sur la Propagation des Ondes Electro  
1950 Magnetiques Sinusoidales dans le Milieux Stratifies.  
Application aux Couches Minces. Ann. Phys. 5  
(Paris) :596-640,706-82.
- Abeles, F. Methods for Determining Optical Parameters of  
1963 Thin Films. In Progress in Optics, vol. 2, ed. E.  
Wolf, 249-88. Amsterdam: North-Holland.
- Baumeister, P. W. Methods of Altering the Characteristics of  
1962 a Multilayer Stack. J. Opt. Soc. Am. 52 :1149-52.
- Behrndt, K. H. Film-Thickness and Deposition-Rate Monitoring  
1966 Devices and Techniques for Producing Films of Uniform  
Thickness. In Physics of Thin Films, vol. 3, ed. G.  
Hass and R. E. Thun, 1-59. New York: Academic.
- Beightler, C. S., D. T. Phillips, D. J. Wilde. Foundations  
1979 of Optimization. 2nd ed. Englewood Cliffs:  
Prentice Hall.
- Bennett, H. E., J. M. Bennett. Precision Measurements in  
1967 Thin Films Optics. In Physics of Thin Films, vol.  
4, ed. G. Hass and R. E. Thun, 1-96. New York:  
Academic.
- Bloom, A. L. Refining and Optimization in Multilayers.  
1981 Appl. Opt. 20 :66-73.

- Borgogno, J. P., E. Pelletier. Use of Fourier Coefficients  
1978 in Multilayer Synthesis Computations. J. Opt. Soc.  
Am. 68 :964-72.
- Bradford, A. L., G. Hass. Increasing the Far-ultraviolet  
1963 Reflectance of Silicon-Oxide-Protected Aluminium  
Mirrors by Ultraviolet Irradiation. J. Opt. Soc.  
Am. 53 1096-100.
- Deutsch, T. F., D. J. Ehrlich, R. M. Dsgood Jr and Z. L.  
1980 Liau. Ohmic contact Formation on InP by Pulsed  
Laser Photochemical Doping. Appl. Phys. Lett. 36  
:847-9.
- Dobrowolski, J. A. Completely Automatic Synthesis of  
1965 Optical Thin Film Systems. Appl. Opt. 4 :937-46.
- Dobrowolski, J. A., D. Lowe. Optical Thin Film Synthesis  
1978 Program Based on the Use of Fourier Transforms.  
Appl. Opt. 17 :3039-50.
- Duposoit, H., J. Morizet. Thin Films Coatings: algorithms for  
1979 the Determination of Reflectance and Transmittance,  
and their Derivatives. Appl. Opt. 18 :2701-4.
- Dushman, S. Scientific Foundations of Vacuum Technique.  
1949 New York: John Wiley.
- Ehrlich, D. J., R. M. Dsgood and T. F. Deutsch. Direct  
1980 Writing of Regions of High Doping on Semiconductors  
by UV-laser Photodeposition. Appl. Phys. Lett. 36  
:916-8.
- Ennos, A. E. Stresses Developed in Optical Film Coatings.  
1966 Appl. Opt. 5 :51-61.
- Feist, W. M., S. R. Steele, D. W. Readey. The Preparation of  
1969 Films by Chemical Vapor Deposition. In Physics of  
Thin Films, vol. 5, ed. G. Hass and R. E. Thun,  
237-322. New York: Academic.
- Fraunhofer, J. Joseph von Fraunhofer's Gesammelte  
1888 Schriften. Munchen. (citado em Pulker 1984, 3).
- Hall Jr, J. F., W. F. C. Ferguson. Dispersion of Zinc  
1955 Sulfide and Magnesium Fluoride in the Visible  
Spectrum. J. Opt. Soc. Am. 45 :74-5.
- Hass, G, J. B. Ramsey, R. Thun. Optical Properties and  
1958 Structure of Cerium Dioxide Films. J. Opt. Soc.
- Hass, G., E. Ritter. Optical Film Materials and Their  
1967 Applications. J. Vac. Sci. Tec. 4 :71-9.
- Heavens, O. S. Optical Properties of Thin Films. London:

- 1955 Butterworths (corrected republication by Dover, New York, 1965).
- Heavens, O. S. Optical Properties of Thin Films. Rep. 1960 Prog. Phys. 23 :1-65.
- Heavens, O. S. Measurement of Optical Constants of Thin 1964 Films. In Physics of Thin Films, vol 2, ed. G. Hass and R. E. Thun, 193-238. New York: Academic.
- Holland, L., W. Steckelmacher. The Distribution of Thin 1952 Films Condensed on Surfaces. Vacuum 2 :346-64.
- Holland, L. Vacuum Deposition of Thin Film. London: 1958 Chapman & Hall.
- Holm, C. Optical Thin Film Production with Continuous 1979 Reoptimization of Layer Thicknesses. Appl. Opt. 18 :1978-82.
- Laan, C. J. v. d., H. J. Frankena. Fast Computation Method 1978 for Derivatives of Multilayer Stack Reflectance. Appl. Opt. 17 :538-41.
- Laan, C. J. v. d. Optical Monitoring of Nonquarterwave 1986 Stacks. Appl. Opt. 25 :753-60.
- Leurgans, J. J. The Impedance Concept in Thin Films. J. 1951 Opt. Soc. Am. 41 :714-7.
- Lewin, G. Fundamentals of Vacuum Science and Technology. 1965 New York: McGraw-Hill.
- Lu, C. S. Mass Determination with Piezoelectric Quartz 1975 Cristal Resonators. J. Vac. Sci. Technol. 12 :578-83.
- Macleod, H. A. Thin-Film Optical Filters. New York: 1969 American Elsevier.
- Macleod, H. A., E. Pelletier. Error Compensation Mechanism 1977 in Some Thin-Film Monitoring Systems. Opt. Acta 24 :907-30.
- Macleod, H. A. Monitoring of Optical Coatings. Appl. Opt. 1981 20 :82-9.
- Maissel, L. I. The Deposition of Thin Films by Cathode 1966 Sputtering. In Physics of Thin Films, vol. 3, ed. G. Hass and R. E. Thun, 61-129. New York: Academic.
- Meiron, J. Damped Least-Squares Method for Automatic Lens 1965 Design. J. Opt. Soc. Am. 55 :1105-9.
- Moore, J. H., C. C. Davis, M. C. Coplan. Building

- 1983 *Scientific Apparatus*. London, Amsterdam, Don Mills, Sydney, Tokio: Addison-Wesley.
- Motter, L. F., V. M. Alves, J. S. Hickmann, T. Braun, et  
1987 alli. Sensor de Pressão Tipo Pirani Construído com Filamentos de Lâmpadas. *Rev. Fis. Apl. e Instr.* 2 :23-35.
- O'Hanlon, J. F. *A User's Guide to Vacuum Technology*.  
1980 New York, Chinchester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley.
- Pelletier, E., P. Roche, B. Vidal. Determination Automatique  
1976 des Constantes Optiques et de L'épaisseur de Couches Dielectriques. *Nouv. Rev. Opt. Appl.* 7 :353-62.
- Perry, D. L. Low-loss Multilayer Dielectric Mirrors. *Appl.*  
1965 *Opt.* 4 :987-91.
- Pipko, A., V. Pliskovsky, B. Korolev, V. Kuznetsov.  
1984 *Fundamentals of Vacuum Techniques*. Moscow: Mir.
- Powell, I, J. C. M. Zwinkels, A. R. Robertson. Development  
1986 of Optical Monitor for Control of Thin-Film Deposition. *Appl. Opt.* 25 :3645-52.
- Present, R. D. *Kinetic Theory of Gases*. Nex York: McGraw-  
1958 Hill.
- Pulker, H. K. *Coating Production: New Ideas at a Time of*  
1978 *Demand*. *Opt. Spectra* 12 :43-6.
- Pulker, H. K. *Coatings on Glass*. Amsterdam, Oxford, New  
1984 York, Tokio: Elsevier.
- Reif, F. *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*.  
1965 New York: McGraw-Hill.
- Reitz, J. R., F. J. Milford, R. W. Christy. *Fundamentos da*  
1982 *Teoria Eletromagnética*. Rio de Janeiro: Campus.
- Schwartz, C., L. F. DeSandre. New Computational Technique  
1987 for Multilayer Stacks. *Appl. Opt.* 26 :3140-44.
- Simmons, D. M. *Nonlinear Programing for Operations*  
1975 *Research*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Sinitsyn, G. V. Purely Optical Discrete Logic Elements Based  
1987 on Bistable Thin-Film Interferometers. *Sov. J. Quantum Electron.*, 17 :328-332.
- Smith, W. J. *Modern Optical Engineering: The Design of*  
1966 *Optical Systems*. New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney: McGraw-Hill.

- Sohm, E. K. Sputtering Techniques for Optical Disk Storage.  
1987 Phot. Spectra 21 :127-9.
- Strong, J. Procedures in Experimental Physics. New York:  
1938 Prentice-Hall.
- Stuart, R. V. An Introduction to Vacuum Technology, Thin  
1985 Films and Sputtering. Orlando, San Diego, New York,  
London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokio: John  
Wiley.
- Taylor, H. D. British Patent Number 29561, Lenses (citado  
1904 em Macleod 1969, 3).
- Thomas, M. T. Vacuum Deposition Techniques. In Vacuum  
1979 Physics and Technology, ed. G. L. Weissler and R.  
W. Carlson, 521-75. Orlando: Academic.
- Zarowin, C. B., N. Venkataramanan, R. Poole. New  
1986 "DiamondlikeCarbon" Film Deposition Process Using  
Plasma Assisted Chemical Vapor Transport. Appl.  
Phys. Lett. 48 :759-61.