UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS

OTICA E TECNOLOGIA DE FILMES FINOS

Jeremias Francisco de Araújo

[redacted]

Dissertação apresentada ao Instituto de Física e Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Física Básica.

Orientador:

Prof.Dr.Jarbas C.de Castro Neto

São Carlos, 1983

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP
FÍSICA

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ____

JEREMIAS FRANCISCO ARAUJO

APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 14 DE junho DE 1983.

COMISSÃO JULGADORA:

Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto - Orientador

Dr. Michel André Aegerter

Dr. Spero Penha Morato

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES (PICD-UFPI), FAPESP, FIPEC, CNPq e Secretaria da Educ.do Estado do Piauí.

À Fátima, à minhas filhas: Gleizeane, Leideane e Ingrid.

À meus pais: Júlio e Lourdes

À meus irmãos

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao Prof.Dr.Jarbas Caiado de Castro Neto pela amizade, pela orientação e pelo estímulo para a realização deste trabalho.

Ao técnico Nelson Maurici, pelo apoio técnico e pela amizade.

Aos técnicos Valdeci e Valdir pela ajuda nos trabalhos computacionais.

A todo pessoal do grupo de Física do Sólido pela amizade e pelo apoio.

A todo pessoal do Instituto de Física e Química de São Carlos da USP, pelo respeito com o qual me trataram durante este período de mestrado.

À minha esposa Fátima, às minhas filhinhas Gleizeane, Leideane e Ingrid, a meus pais e a meus irmãos por todo amor, carinho e compreensão.

INDICE

Lista de Ilustrações..... i

Lista de Tabelas..... vi

Resumo..... vii

Abstract..... viii

Introdução..... 1

CAPÍTULO I - TEORIA DE ÓTICA DE FILMES FINOS..... 5

1.1. Introdução..... 5

1.2. Revisão das equações de onda do campo eletromagnético..... 6

1.3. Ótica de camadas dielétricas..... 10

1.3.1. Notação..... 10

1.3.2. Condições de contorno..... 12

1.3.3. Fórmulas de Fresnel..... 13

1.3.4. Tratamento matricial de reflexão e transmissão..... 15

1.3.5. Sistema de múltiplas camadas..... 17

1.3.6. Matriz inteferência..... 18

CAPÍTULO II -CÁLCULOS NUMÉRICOS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS 20

2.1. Introdução..... 20

2.2. Cálculo das espessuras das camadas..... 20

2.3. Cálculo do npumero de pares de camadas 24

2.4. Cálculo de "R" e "T" para sistemas MCD. 25

2.5. Cálculo de "R" e "T" para sistemas MCM. 30

2.6. Descrição do método do cálculo computacional..... 34

2.6.1. Método do cálculo do programa PESP... 34

2.6.2. Método do cálculo do programa PFIL... 36

2.6.3. Método do cálculo do programa FMED... 38

CAPÍTULO III- FILMES FINOS ESPECIALIZADOS..... 41

3.1. Introdução..... 41

3.2. Coating ANTI-REFLETOR..... 41

3.2.1. Coating anti-refletor com uma camada. 41

3.2.2. Coating anti-refletor com duas camadas..... 43

3.2.3. Coating anti-refletor com três camadas..... 45

3.3. Espelho dielétrico de alta refletividade..... 47

3.4. Filtros passa banda..... 52

3.5. Filtro passa banda estreita..... 54

3.6. Separadores de feixes..... 57

3.6.1. Separedores neutros..... 58

3.6.2. Espelhos dicroicos..... 59

CAPÍTULO IV -TECNOLOGIA UTILIZADA EM FILMES FINOS..... 62

4.1. Introdução..... 62

4.2. Descrição da evaporadora..... 62

4.3. Descrição do sistema de limpeza..... 65

4.4. Obtenção dos fatores de potência da evaporadora..... 67

4.5. Descrição do sistema de medida..... 69

4.6. Calibração das espessuras produzidas por medida fotométrica..... 71

4.7. Conclusão..... 74

CAPÍTULO V - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES..... 75

5.1. Introdução..... 75

5.2. Coating anti-refletor..... 75

5.2.1. Coating anti-refletor com uma camada. 76

5.2.2. Coating anti-refletor com duas camadas..... 78
5.2.3. Coating anti-refletor com três camadas..... 80
5.3. Espelhos dielétricos de alta refletividade..... 82
5.3.1. Espelho para lasers de alta potência 82
5.3.2. Espelhos duros e de banda larga ("hard coating")..... 84
5.4. Filtros passa-banda..... 87
5.4.1. Filtro passa alto..... 87
5.4.2. Filtro passa baixo..... 89
5.5. Filtro interferencial..... 91
5.5.1. Filtro PBE (MDM)..... 92
5.5.2. Filtro PBE (ADI)..... 94
5.5.3. Filtro PB de duas meias ondas..... 96
CAPÍTULO VI -CONCLUSÕES..... 98
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 99
APÊNDICE I - Programa PESP..... 100
APÊNDICE II- Programa PFIL..... 102
APÊNDICE III-Programa FMED..... 113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 119

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração das hipóteses i) e ii) 6

Figura 2 - Esquema de um sistema de múltiplas camadas dielétricas 10

Figura 3 - Orientação do sistema de coordenadas e o triedro para as ondas eletromagnéticas s e p 11

Figura 4 - Esquema das projeções para as polarizações s e p... 13

Figura 5 - Esquema mostrando a geometria para se calcular a espessura da ν-ésima camada 21

Figura 6 - Esquema de filmes finos de sistemas de múltiplas camadas 26

Figura 7 - Fluxograma do método do cálculo do programa PESP . FOR 35

Figura 8 - Fluxograma do método do cálculo do programa PFIL . FOR 38

Figura 9 - Fluxograma do método do cálculo do programa FMED . FOR 39

Figura 10- Fluxogramas da subroutina filmed (a) e da subrotina Interp (b) 40

Figura 11- Ilustração do coating anti-refletor com uma camada. 42

Figura 12- Curva teórica do "coating" com uma camada de MgF_2.. 43

Figura 13- Ilustração do coating anti-refletor com duas camadas 44

Figura 14- Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para o coating anti-refletor com duas camadas ($\lambda/4$-$\lambda/4$), N_1=1.38 e N_2=1.70 44

Figura 15- Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para o coating anti-refletor com duas camadas ($\lambda/4$-$\lambda/2$), N_1=1.38 e N_2=1.70 45

Figura 16 - Ilustração do coating anti-refletor com três camadas de espessuras $\lambda/4-\lambda/4-\lambda/4$ 46

Figura 17 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para coating anti-refletor com três camadas ($\lambda/4-\lambda/=-\lambda/4$) com N_1=1.38, N_2=2.30 e N_3=1.70 46

Figura 18 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para coating anti-refletor com três camadas ($\lambda/4-\lambda/2-3\lambda/4$), com N_1=1.38, N_2=2.30 e N_3=1.70 47

Figura 19 - Esquema do empilhamento $\lambda/4$ 49

Figura 20 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda para espelhos de alta refletividade com 7 e 9 camadas respectivamente com (Ti_2O_3) e N_L=1.45 (SiO_2) 49

Figura 21 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda para espelhos de alta refletividade de banda larga (23 camadas) projetado com NH=2.30 e NL=1.45 50

Figura 22 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para espelho de alta refletividade de banda estreita (23 camadas) projetado a partir de empilhamento de materiais com NH=1.70 , NL=1.38 e espessura $\lambda/4$ 51

Figura 23 - Esquema protótipo para filtros passa baixo (a) e filtros passa alto (b) 52

Figura 24 - Esquema de empilhamento $\lambda/8-\lambda/4-...\lambda/4-\lambda/8$, para filtro passa banda 53

Figura 25 - Curva teórica da refletividade em função do com - primento de onda para um filtro passa baixo obtido a partir do programa PFIL.FOR, sequência 5 ou 11, para K=10, NH=2.30 e NL=1.45..... 53

Figura 26 - Curva teórica da refletividade em função do com - primento de onda para um filtro passa alto obtido a partir do programa PFIL.FOR, sequência 5 ou 11, K=10, NH=2.30 e NL=1.45..... 54

Figura 27 - Esquema de filtros passa banda estreita MDM (a) e ADI (b)..... 55

Figura 28 - Curvas teóricas da transmissão em função do com - primento de onda para dois filtros interferenciais todo dielétrico (ADI) com K=5, K_1=1, K=2, K_1=1 e NH=2.30, NL=1.45. Essas curvas são obtidas a partir da sequência 9 do programa PFIL.FOR..... 56

Figura 29 - Curva teórica da transmissão em função do comprimento de onda, para um filtro interferencial me - tal-dielétrico-metal (MDM) de Al-MgF_2-Al, obtido a partir do programa FMED.FOR..... 57

Figura 30 - Ilustração de um separador de feixe neutro..... 58

Figura 31 - Curva teórica da refletividade em função da espessura para o espelho de Al..... 59

Figura 32 - Esquema de um sistema seletivo de côr..... 60

Figura 33 - Curva teórica da refletividade em função do com - primento de onda, para um separador de feixe seletivo de côr obtido através das sequências 4 e 5 do programa PFIL.FOR com K=10, NH=2.30 e NL=1.45. 61

Figura 34 - Esquema do sistema de controle dos parâmetros de evaporação..... 63

Figura 35 - Esquema do sistema de vácuo da evaporadora..... 65

Figura 36 - Esquema do sistema de limpeza de substratos (banho térmico) 66

Figura 37 - Curva experimental potência verso tempo para um filme de sete camadas de Ti_2O_3-SiO_2 69

Figura 38 - Esquema do acessório de medida da refletividade.. 70

Figura 39 - Curva teórica da refletividade do coating de uma camada utilizada na calibração das espessuras, (nG=índice do vidro, nF=índice do filme) 72

Figura 40 - Curva experimental do teste de Ti_2O_3 para calcular o fator de correção 73

Figura 41 - Curva experimental do coating anti-refletor com uma camada de criolita 77

Figura 42 - Curvas experimentais do coating anti-refletor com duas camadas (a) $\lambda/4$-$\lambda/2$ e (b) $\lambda/4$-$\lambda/4$ 79

Figura 43 - Curva experimental do coating anti-refletor com três camadas de espessura $\lambda/4$-$\lambda/2$-$\lambda/4$ 81

Figura 44 - Curva experimental do espelho para lasers de alta potência 83

Figura 45 - Curva experimental do espelho duro e de banda larga para ângulo de incidência 45° 85

Figura 46 - Curva experimental do espelho duro e de banda larga para ângulo de incidência de 0° 86

Figura 47 - Curva experimental do filtro passa alto 88

Figura 48 - Curva experimental do filtro passa baixo 90

Figura 49 - Curva experimental do filtro passa banda estreito (MDM) para $\Delta\lambda$=60 nm 92

Figura 50 - Curva experimental do filtro passa banda estreito (MDM) para $\Delta\lambda$=30 nm 93

Figura 51 - a) Curva experimental do filtro passa banda estreito (ADI), b) expansão 10 vezes para em torno de 559nm 95

Figura 52 - Curva experimental do filtro de duas meias on - das..... 97

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Tabela de fatores de potência..... 68

Tabela II - Dados para o coating anti-refletor com uma camada..... 76

Tabela III - Dados para o coating anti-refletor com duas camadas..... 78

Tablea IV - Dados para o coating anti-refletor com três camadas..... 80

Tabela V - Dados para o espelho para lasers de alta potência..... 82

Tabela VI - Dados para espelhos duros e de banda larga ("hard coating")..... 84

Tabela VII - Dados para o filtro passa alto..... 87

Tabela VIII- Dados para o filtro passa baixo..... 89

Tabela IX - Dados para o filtro passa banda estreito (MDM) 91

Tabela X - Dados para o filtro passa banda estreito (ADI) 94

Tabela XI - Dados para o filtro passa banda duas meias ondas..... 96

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver a tecnologia de produção de filmes finos de precisão, de materiais dielétricos e/ou metálicos sobre componentes óticos de precisão. Para tal, cálculos computacionais de filmes finos foram desenvolvidos, tendo como finalidade projetarmos teoricamente qualquer tipo de camadas finas. As características dos filmes são mostradas graficamente ou em forma de tabela.

A tecnologia de evaporação em alto vácuo de materiais tais como SiO_2, Ti_2O_3, MgO, MgF_2 e criolita (Na_3ALF_6), foi implantada no laboratório de filmes finos do DFCM. Alguns desses materiais, os óxidos, foram evaporados pioneiramente no Brasil neste trabalho.

As camadas estudadas foram: Anti-refletoras com uma, duas e três camadas, espelhos de alta refletividade para lasers, filtros interferencial, filtros passa banda, separadores de feixes, etc.

Tendo como ponto de partida os cálculos computacionais desenvolvidos e a tecnologia de evaporação implantada, algumas camadas de filmes finos de utilidade em ótica foram finalmente produzidas.

A caracterização dos filmes finos por nós produzidos foi feita por medida da reflexão ou transmissão na região do infravermelho próximo, visível e ultravioleta, sendo para tal utilizado o espectrofotometro Cary 17. Estes espectros mostram boa concordância com os resultados teóricos obtidos.

ABSTRACT

In this work we developed the technology of production of precision metalic and/or dielectric thin films evaporated on optical components. Numerical calculations of the characteristics of the films was developed allowing the knowledge of the reflectance spectra of the coatings before the evaporation, saving the cost of test by evaporation.

The high vacuum evaporation technique of materials like SiO_2, Ti_2O_3, MgO, Al_2O_3, MgF_2 and criolite (Na_3AlF_6) was implanted in the thin film laboratory of the DFCM. Some of this materials was evaporated by the first time in Brasil in this work.

The coatings studied was: Anti-reflecting coatings of one, two and three layers, high reflecting mirrors for lasers, band pass filter, high and low pass filters.

Starting with the numerical calculations some of the most frequently used coating in optics was projected and finally produced in the laboratory. These films were characterized by the spectra of reflection obtained with the spectrometer Cary 17. The characteristics of the films produced agree very well with the calculations.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das técnicas e instrumentos de ótica de precisão foi consequência do domínio da tecnologia de produção de múltiplas camadas de filmes finos óticos e das técnicas de produção de superfícies óticas precisas.

Neste trabalho trataremos da tecnologia de filmes finos utilizados em ótica.

Os filmes finos são depositados em componentes óticos com o objetivo de aumentar ou diminuir a refletividade das interfaces entre dois meios de índices de refração diferentes. Esse aumento ou diminuição de refletividade é causado pela interferência construtiva ou destrutiva provocada pelas camadas de filmes finos.

De acordo com a organização, índice de refração dos materiais e números de camadas depositadas sobre os componentes óticos, temos os diversos tipos de recobrimento ("coatings"). Os "coatings" mais comumente utilizados em ótica são: coatings anti-refletores com uma camada, coatings anti-refletores com duas camadas, coatings anti-refletores com três camadas, espelhos de alta refletividade, filtros interferenciais, filtros passa banda e separadores de feixes.

Os <u>coatings anti-refletores</u> são utilizados para diminuir a refletividade nas superfícies dos componentes óticos. Esses coatings podem ser feitos com uma, duas ou três camadas de materiais de índice de refração diferentes, sendo que a medida que o número de camadas aumenta, a refletividade da superfície diminue. Por exemplo a refletividade de um coating anti-refletor com uma camada no espectro visível é em média aproximadamente igual a 1% , sendo menor que 0,1% para um coating anti-refletor com três cama-

das e de aproximadamente 4,5% para uma superfície de vidro sem coatings. Coating anti-refletor de uma camada são largamente utilizados em instrumentos óticos de média precisão tais como camaras fotográficas, enquanto os coatings anti-refletores de mais de uma camada são utilizados em instrumentos de precisão como lasers , etc.

Os espelhos de alta refletividade são sistemas de múltiplas camadas dielétricas de índice de refração alternados alto e baixo. Nesses "coatings" a refletividade é uma função do número de pares de camadas, tendo como limite superior a refletividade de 100%. A absorção nesses coatings é desprezível. Por essas razões esses coatings são utilizados em cavidades óticas e lasers de alta potência substituindo os espelhos metálicos cuja refletividade é no máximo 95% e a absorção no mínimo de 5%.

Os filtros interferenciais são coatings de múltiplas camadas dielétricas ou metálicas, nos quais o espectro de transmissão se caracteriza por transmitir em uma faixa estreita de frequência. Esses filtros podem ser constituído de camadas metal/dielétrico / metal (MDM) ou todo dielétrico (ADI). Os filtros são utilizados principalmente em sistemas espectrométricos.

Os filtros passa banda são coatings de múltiplas camadas dielétricas os quais atenuam determinada região espectral e transmitem (isto é, passa banda) na outra. Temos dois tipos de filtros passa banda: filtro passa alto nos quais os comprimentos de onda maiores que um dado valor são transmitidos e filtro passa baixo nos quais o oposto é válido.

Os separadores de feixes são utilizados para dividir um feixe incidente em dois com intensidades diferentes (separadores neutros), ou com frequências diferentes (espelhos dicroicos). Os separadores de feixes convencionais eram de prata. Estes deteriorizam rapidamente e absorvem um terço da luz incidente. Os separa

dores de feixes de múltiplas camadas dielétricas tem a vantagem de não deteriorizar, nem absorver o fluxo de luz incidente. Esses são utilizados como separadores de cor em televisão e em sistemas fotográficos.

Os cálculos desenvolvidos neste trabalho visam reproduzir teoricamente, com as características dos materiais disponíveis as propriedades dos coatings acima descritos. Nesses cálculos uma otimização das características dos filtros é produzida experimentalmente no laboratório de filmes finos.

Para a obtenção de filmes de alta performance implementamos a tecnologia de evaporação de materiais óxidos em atmosfera reagente. Essa tecnologia nos permite por exemplo produzir coatings duros e resistentes com materiais tais como Ti_2O_3, SiO_2, etc. Além disso, na classe dos óxidos podemos encontrar uma gama grande de índices de refração o que flexibiliza sua utilização.

Os filmes produzidos são finalmente caracterizados através da medida da refletividade ou transmissão em função do comprimento de onda.

No Capítulo I, damos uma introdução geral e aplicação das equações de Maxwell para obtenção do método matricial com a finalidade de calcular a refletividade e a transmissão dos filmes finos. No Capítulo II, calculamos detalhadamente alguns parâmetros para as camadas finas acima, que servem de ponto de partida para projetar e graficar o espectro da refletividade das camadas finas em estudo. Apresentamos também o método do cálculo dos programas desenvolvidos com um fluxograma e seus respectivos comentários. No Capítulo III, descrevemos teoricamente de uma maneira resumida os tipos de camadas descritas acima. No Capítulo IV, descrevemos a tecnologia desenvolvida para evaporação dos filmes finos sobre os componentes óticos. No Capítulo V, apresentamos os resultados e

respectivas discussões de todos estes tipos de camadas finas, que foram por nós feitos, a evaporação e medidas espectrométricas. E finalmente no Capítulo VI, damos as conclusões finais desse trabalho.

CAPÍTULO I

TEORIA DE ÓTICA DE FILMES FINOS

1.1. Introdução

Neste capítulo mostraremos a partir das equações de Maxwell para um meio isotrópico, as equações das ondas eletromagnéticas e suas respectivas soluções, para uma onda monocromática. Essas equações são utilizadas em ótica de camadas dielétricas, onde vários conceitos e notações são definidos para seu entendimento.

No final deste capítulo mostraremos o sistema de matriz interferência o qual é usado nas estruturas periódicas que compõem os coatings descritos no capítulo III. Essas estruturas periódicas serão utilizadas para desenvolvimento de programas computacionais dados no capítulo II.

A Teoria de Ótica de Filmes Finos baseia-se na teoria macroscópica de Maxwell de ondas eletromagnéticas aplicadas para a propagação de luz, através de um sistema de múltiplas camadas. As hipóteses assumidas no cálculo são:

i) a massa do filme é um meio oticamente isotrópico, caracterizado por um índice de refração n, que é real para materiais dielétricos e complexo para os metais.

ii) os dois meios adjacentes são separados por um plano, aonde ocorre uma descontinuidade na ligação dos índices de refração.

iii) uma camada é definida no espaço por dois planos divididos paralelamente como em ii. A espessura das camadas é da ordem do comprimento de onda da luz.

iv) a onda incidente é considerada como sendo plana, monocromática e linearmente polarizada num dos dois tipos de polari-

zação básica s (perpendicular ao plano de incidência) ou p (paralelo ao plano de incidência).

A figura 1 mostra algumas dessas hipóteses para melhor visualização.

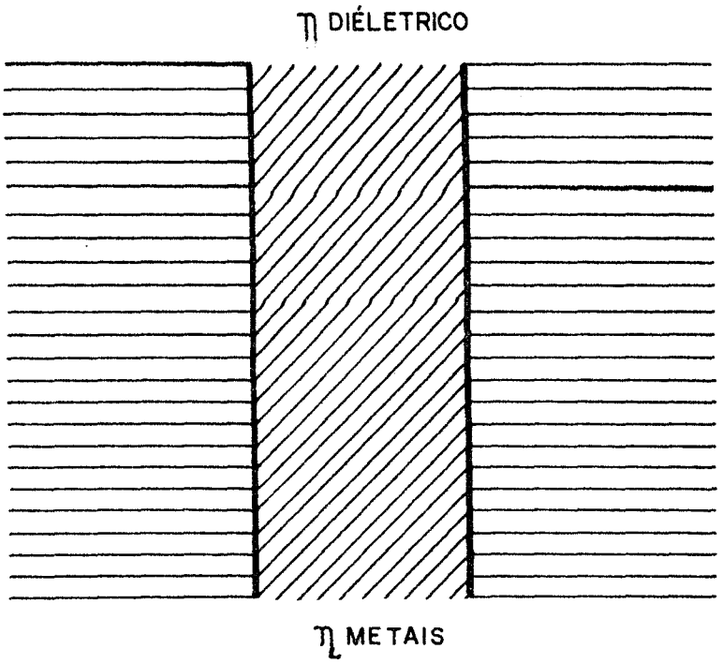


Fig. 1 - Ilustração das hipóteses i e ii.

Até Agora

1.2. Revisão das equações da onda do campo eletromagnético

As equações de Maxwell em um meio infinito na ausência de carga são dadas por:

$$\vec{\nabla}.\vec{E} = 0 \tag{1}$$

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} + (1/c)\,\partial\vec{B}/dt = 0 \tag{3}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} - (\mu\varepsilon/c)\,\partial\vec{E}/dt = 0 \tag{4}$$

Substituindo a eq. 4 na equação resultante da aplicação do rotacional a eq.3 e utilizando algumas propriedades de álgebra vetorial obtemos a equação da onda para o campo elétrico em meio homogêneo

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{5a}$$

Utilizando-se o mesmo procedimento a partir da equação 3 obtemos a equação de onda para o campo magnético

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \tag{5b}$$

Como a onda é monocromática, podemos escrever

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_r(\vec{r})\exp(i\omega t) \tag{6a}$$

$$\vec{B}(\vec{r},t) = \vec{B}_r(\vec{r})\exp(i\omega t) \tag{6b}$$

onde a $\exp(i\omega t)$ é a dependência temporal dos campos.

Se substituirmos as equações 6a e 6b nas equações 5a e 5b encontraremos

$$\nabla^2 \vec{E}_r(\vec{r}) + \omega^2 \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \vec{E}_r(\vec{r}) = 0 \tag{7a}$$

$$\nabla^2 \vec{B}_r(\vec{r}) + \omega^2 \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \vec{B}_r(r) = 0 \tag{7b}$$

cuja as soluções são as ondas planas. Considerando a direção de propagação como sendo ao longo do eixo-z temos

$$\vec{E}_r = \vec{E}_r(z) \qquad \text{e} \qquad \vec{B}_r = \vec{B}_r(z)$$

então podemos escrever as equações 7a e 7b como

$$\frac{d^2 \vec{E}_r(z)}{dz^2} + \omega^2 \frac{\mu\varepsilon \vec{E}_r(z)}{c^2} = 0 \tag{8a}$$

$$\frac{d^2\vec{B}_r(z)}{dz^2} + \omega^2 \frac{\mu\varepsilon\vec{B}_r(z)}{c^2} = 0 \tag{8b}$$

as quais possuem as seguintes soluções

$$\vec{E}_r(z) = \vec{E}_0 \exp(\pm i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} z) \tag{9a}$$

$$\vec{B}_r(z) = \vec{B}_0 \exp(\pm i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} z) \tag{9b}$$

onde $\vec{E}_o$ e $\vec{B}_o$ são vetores constantes e o sinal + e - significa respectivamente que a propagação é no sentido negativo e positivo do eixo-z.

Substituindo a eq.9a na eq.1, $\vec{\nabla}.\vec{E} = 0$,

$$\frac{d\vec{E}_z(z)}{dz} = +i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} \vec{E}_z(z) = 0$$

$$\vec{E}_z(z) = 0 \tag{10}$$

Portanto o vetor campo elétrico de uma onda plana não tem componente na direção z, isto é, ele é paralelo a frente de onda. De modo geral podemos escrever

$$\vec{E}_r(z) = (\hat{x}E_{ox} + \hat{y}E_{oy})\exp(\pm i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} z) \tag{11}$$

tomando o rotacional da eq.11.

$$\vec{\nabla}\times\vec{E}_r(z) = \pm(-\hat{x}E_{oy}+\hat{y}E_{ox})i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} \exp(\pm i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} z)$$

como $\vec{E}(z,t) = \vec{E}_r(z)\exp(i\omega t)$ então

$$\vec{\nabla}\times\vec{E}(z,t) = \pm(-\hat{x}E_{oy}+\hat{y}E_{ox})i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} \exp(+i\omega \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c} z)\exp(i\omega t) \tag{12}$$

lembrando que

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}(z,t) = i\omega\vec{B}_r(z)\exp(i\omega t) \tag{13}$$

e substituindo as eqs.12 e 13 na eq.3 encontramos

$$\vec{B}_r(z) = \mp\ (-\hat{x}E_{oy} + \hat{y}E_{ox})\sqrt{\mu\varepsilon}\ \exp\{\pm i\omega\ \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{c}\ z)$$

comparando a equação acima com a eq.11 ficaremos com

$$\vec{B}_r(z) = \mp\ \sqrt{\mu\varepsilon}\hat{z}\times\vec{E}_r(z) \tag{14}$$

Portanto $\vec{B}_r(z)$ é perpendicular a $\vec{E}_r(z)$ e ao eixo z. Como μ=1 para materiais dielétricos temos

$$\omega\ \frac{\sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{\omega n}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda} \tag{15}$$

onde

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon} \tag{16}$$

Podemos finalmente escrever

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_o\exp\left[-i(\mp\ \frac{2\pi}{\lambda}\ nz - \omega t)\right] \tag{17}$$

$$\vec{H}(z,t) = \frac{\vec{B}(z,t)}{\mu} = \mp\ n\hat{z}\times\vec{E}_o\exp\left[-i(\mp\ \frac{2\pi}{\lambda}\ nz - \omega t)\right]$$

Essas são as expressões para os campos das ondas eletromagnético , que serão importantes neste estudo de ótica de filmes finos, aplicados para sistemas de múltiplas camadas dielétricas.

1.3. Ótica de camadas dielétricas

Esta seção compreende uma das partes mais importantes nesse trabalho, pois nela mostraremos toda a teoria de ótica de filmes finos em sistemas de múltiplas camadas dielétricas. Para isto dividimos em seis sub-seções a qual passaremos a descrevê-las.

1.3.1. Notação

Nesse trabalho seguiremos a notação convencionalmente utilizada em filmes finos[1,2]. Para tal vejamos a figura 2.

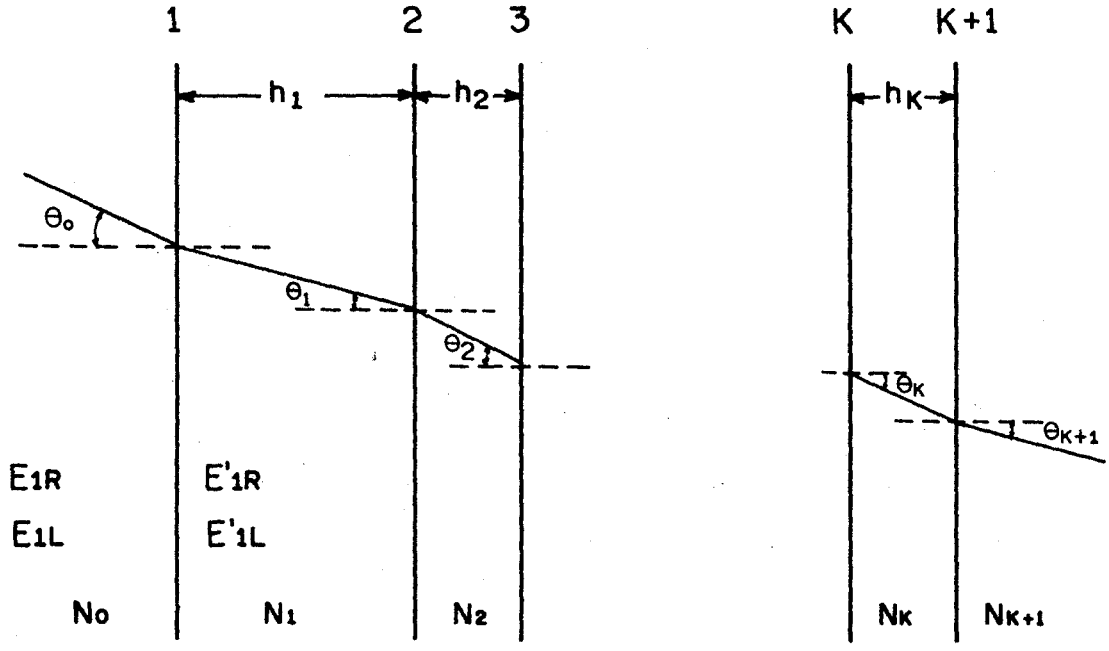


Fig.2 - Esquema de um sistema de múltiplas camadas dielétricas.

A figura 2 mostra um sistema de múltiplas camadas dielétricas. Com k camada existem k+1 contorno, numerados de 1 até k+1. Os ângulos de refração são denotados por $\theta_o, \theta_1, \ldots \theta_{k+1}$, sendo que a onda incidente da origem as ondas refletidas e refratadas em todos os meios, exceto o espaço de saída, onde somente existirá a onda refratada. Os parâmetros que caracterizam as ondas vindo pela

direita e pela esquerda possuem os subscritos R e L respectivamente (do inglês "right" e "left"). Assim $|E_{1R}$ é a amplitude do campo elétrico da onda incidente da direita medida no primeiro contorno, enquanto que $|E_{1L}$ é a amplitude do campo elétrico da onda incidente da esquerda medida no primeiro contorno. O (') para o segundo contorno, ('') para o terceiro contorno e assim por diante. h_1 é a espessura da primeira camada entre os contornos 1 e 2. h_2 é a espessura da segunda, ... h_k da última camada. ε_{1R} e ε_{1L} são as amplitudes complexas dos campos elétricos $|E_{1R}$ e $|E_{1L}$, respectivamente. Usamos para as componentes tangenciais das amplitudes complexas a seguinte notação $(\varepsilon)_{tg} = \vec{E}$, $(\mathcal{H})_{tg} = \vec{H}$.

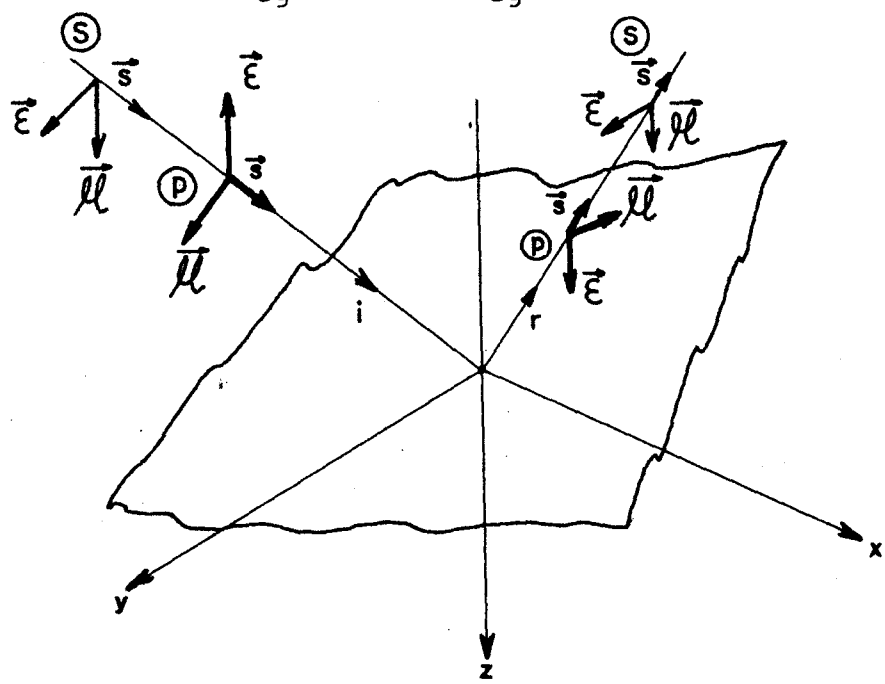


Fig.3 - Orientação do sistema de coordenadas e o triedro para as ondas eletromagnéticas s e p.

A figura 3 mostra a orientação do sistema de coordenadas e o triedro para as ondas eletromagnéticas onde:

s representa polarização do tipo-s, transversal elétrica (TE).

p representa polarização do tipo-p, transversal magnética (TM).

Em toda onda eletromagnética plana os vetores $\{\vec{E},\vec{H},\vec{s}\}$

formam um triedro regular direito.

A figura 3 anterior mostra a orientação dos vetores $\{\vec{E},\vec{H},\vec{s}\}$ ao inciderem (i) e após a incidência ao refletirem (r) para os dois tipos de polarização s e p, num sistema de coordenadas x,y,z.

1.3.2. Condições de contorno

As condições de contorno são de grande importância para entendermos a física aplicada a interface de separação entre dois meios.

Em um sistema de múltiplas camadas dielétricas definimos de ADMITÂNCIA ótica do meio, Y, como sendo a razão das componentes das intensidades magnética e elétrica da onda caminhando pela direita.

$$Y = \frac{\vec{H}_R}{\vec{E}_R} \tag{18}$$

Para as polarizações s e p projetadas corretamente temos as seguintes expressões

$$Y_s = \frac{\vec{H}_R}{\varepsilon_R} = -n\cos\theta \tag{19a}$$

$$Y_p = \frac{\mathcal{H}_R}{\vec{E}_R} = \frac{n}{\cos\theta} \tag{19b}$$

De acordo com a figura 4.

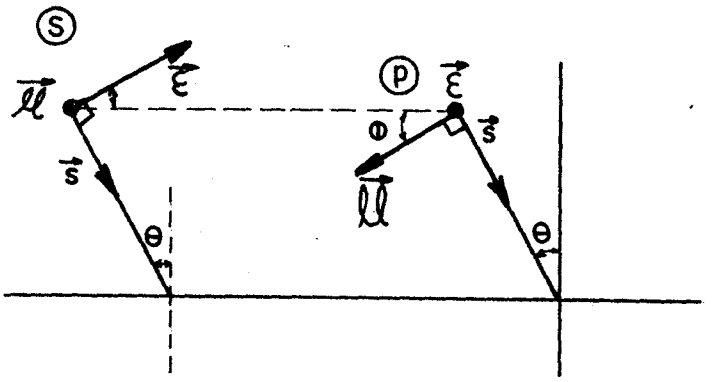


Fig.4. Esquema das projeções para as polarizações s e p.

As condições de contorno relacionam as componentes dos campos da seguinte forma: As intensidades das componentes tangenciais dos campos elétricos e magnéticos na superfície de separação de dois meios são contínuas.

Aplicando as condições de contorno para os campos elétrico e magnético a ν-ésima superfície temos

$$\vec{E}_{\nu t} = \vec{E}_{\nu R} + \vec{E}'_{\nu L} = \vec{E}'_{\nu R} + \vec{E}'_{\nu L} \tag{20a}$$

$$\vec{H}_{\nu t} = Y_{\nu-1}\vec{E}_{\nu R} - Y_{\nu-1}\vec{E}_{\nu L} = Y_{\nu}\vec{E}'_{\nu R} - Y_{\nu}\vec{E}'_{\nu L} \tag{20b}$$

onde Y_{ν}, $Y_{\nu-1}$ podem ser $Y_{\nu s}$, $Y_{\nu-1,s}$ ou $Y_{\nu p}$, $Y_{\nu-1,p}$ de acordo com o tipo de polarização considerada.

1.3.3. Fórmulas de Fresnel

Consideremos o ν-ésimo contorno isolado, iluminado por uma onda vindo da direita, portanto $\vec{E}'_{\nu L} = 0$, temos

$$\vec{E}_{\nu R} + \vec{E}_{\nu L} = \vec{E}'_{\nu R} \tag{20c}$$

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP
FÍSICA

$$Y_{\nu-1}\vec{E}_{\nu R} - Y_{\nu-1}\vec{E}_{\nu L} = Y_{\nu}E'_{\nu R} \tag{20d}$$

Combinando essas expressões obtemos

$$\frac{\vec{E}_{\nu L}}{\vec{E}_{\nu R}} = \frac{Y_{\nu-1} - Y_{\nu}}{Y_{\nu-1} + Y_{\nu}} = (r_{\nu R}) \tag{21a}$$

sendo essa expressão a razão entre a onda refletida e a incidente define-se como coeficiente de reflexão de Fresnel, $(r_{\nu R})$.

Combinando novamente as equações 20c e 20d obtemos

$$\frac{\vec{E}'_{\nu R}}{\vec{E}_{\nu R}} = \frac{2Y_{\nu-1}}{Y_{\nu-1} + Y_{\nu}} = (t_{\nu R}) \tag{21b}$$

que é a razão entre a onda transmitida e a onda incidente, portanto o coeficiente de transmissão de Fresnel, $(t_{\nu R})$.

Devido a razão entre os raios incidentes e refletidos , das componentes tangenciais $\vec{E}_{\nu L}/\vec{E}_{\nu R}$, ser a mesma que das amplitudes complexas $\varepsilon_{\nu L}/\varepsilon_{\nu R}$, pois computamos $\vec{E}_{\nu L}$ como sendo $\varepsilon_{\nu L}\cos\theta$ e $\vec{E}_{\nu R}$ como $\varepsilon_{\nu R}\cos\theta$, para caso s, e $\vec{E}_{\nu L}$ como sendo $\varepsilon_{\nu L}$, $\vec{E}_{\nu R}$ como sendo $\varepsilon_{\nu R}$ para o caso p, a fórmula 21a do coeficiente de reflexão de Fresnel será a mesma para os dois tipos de polarização s e p, daí $(r_{\nu R})_s$, $(r_{\nu R})p$. Para a luz transmitida a eq.21b é idêntica somente para o caso-s, pois ε e $\vec{E}$ são idênticos. Para a polarização do caso-p computamos $\vec{E}_{\nu R}$ como $\varepsilon_{\nu R}\cos\theta_{\nu}$ e $\vec{E}'_{\nu R}$ como sendo $\varepsilon'_{\nu R}\cos\theta_{\nu-1}$, logo a razão entre as ondas incidentes e transmitida existirá um fator adicional $\cos\theta_{\nu}/\cos\theta_{\nu-1}$ no lado direito da eq.21b. Para generalizarmos essa equação é que definimos o coeficiente c_{ij} como sendo

$$c_{ij} = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_j}$$

para identificar o tipo de polarização utilizado. Se i=j c_{ij} =1 pa

ra polarização do tipo s. E se $i \neq j$ $c_{ij} = \cos\theta_i/\cos\theta_j$ para a polarização do tipo p. De tal forma que a eq.21b aparecerá este coeficiente, ficando igual a

$$(t_{\nu R})_{\substack{s\\p}} = c_{ij} \frac{2Y_{\nu-1}}{Y_{\nu-1} + Y_\nu}$$

1.3.4. Tratamento matricial de reflexão e transmissão

Nós chamamos de matriz de admitância V_ν dos coeficientes das fórmulas de Fresnel.

Reescrevendo as fórmulas de Fresnel, as eqs.20a e 20b na forma seguinte

$$\vec{E}_{\nu t} = 1\vec{E}'_{\nu R} + 1\vec{E}'_{\nu L} = \vec{E}_{\nu R} + \vec{E}_{\nu L}$$

$$\vec{H}_{\nu t} = Y_\nu\vec{E}'_{\nu R} - Y_\nu\vec{E}'_{\nu L} = Y_{\nu-1}\vec{E}_{\nu R} + Y_{\nu-1}\vec{E}_{\nu L}$$

e definindo a matriz de admitância, V_ν, como

$$V_\nu = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ Y_\nu & -Y_\nu \end{vmatrix} \tag{22}$$

Podemos escrever as equações de Fresnel na forma matricial

$$V_{\nu-1} \begin{vmatrix} \vec{E}_{\nu R} \\ \vec{E}_{\nu L} \end{vmatrix} = V_\nu \begin{vmatrix} \vec{E}'_{\nu R} \\ \vec{E}'_{\nu L} \end{vmatrix}$$

ou ainda

$$\begin{vmatrix} \vec{E}_{\nu R} \\ \vec{E}_{\nu L} \end{vmatrix} = W_{\nu-1/\nu} \begin{vmatrix} \vec{E}'_{\nu R} \\ \vec{E}'_{\nu L} \end{vmatrix} \tag{23}$$

onde $W_{\nu-1/\nu} = V^{-1}_{\nu-1} V_\nu$ é a matriz de transferência e $V^{-1}_{\nu-1}$ =

$$= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & Y^{-1}_{\nu-1} \\ 1 & -Y^{-1}_{\nu-1} \end{vmatrix}$$ é a matriz inversa de $V_{\nu-1}$.

A matriz de transferência, $W_{\nu-1/\nu}$ transforma os campos elétricos de um lado para o outro do contorno ν .

A partir da expressão para o campo elétrico eq.17, podemos relacionar os campos elétricos no lado esquerdo da interface ν, $\vec{E}'_\nu$, com o campo no lado direito da interface $\nu+1$, $\vec{E}_{\nu+1}$.

$$\vec{E}'_{\nu L} = \vec{E}_{\nu+1/L} \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} n_\nu h_\nu \cos\theta_\nu\right]$$

$$\vec{E}'_{\nu R} = \vec{E}_{\nu+1/R} \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} n_\nu h_\nu \cos\theta_\nu\right]$$

Podemos ainda escrever as equações acima na forma matricial

$$\begin{vmatrix} \vec{E}'_{\nu L} \\ \\ \vec{E}'_{\nu R} \end{vmatrix} = U_\nu \begin{vmatrix} \vec{E}_{\nu+1/L} \\ \\ \vec{E}_{\nu+1/R} \end{vmatrix} \qquad (24)$$

onde

$$U_\nu = \begin{vmatrix} \exp(i\phi_\nu) & 0 \\ \\ 0 & \exp(-i\phi_\nu) \end{vmatrix}$$

e

$$\phi_\nu = \frac{2\pi}{\lambda} n_\nu h_\nu \cos\theta_\nu$$

A matriz U_ν transfere os campos elétricos de uma interface a outra dentro de uma mesma camada ν . Essa matriz é chamada matriz de fase.

1.3.5. Sistema de múltiplas camadas

Para um sistema de múltiplas camadas dielétricas a transformação do campo se dá pelo produto das matrizes de transferências correspondentes a cada interface e as matrizes de fase correspondentes as camadas respectivas, ou seja,

$$\begin{vmatrix} \vec{E}_{1R} \\ \\ \vec{E}_{1L} \end{vmatrix} = W_{01}\ U_1\ W_{12}\ U_2 \ldots W_{k-1/k}\ U_k\ W_{k/k+1} \begin{vmatrix} E'_{k+1/R} \\ \\ E'_{k+1/L} \end{vmatrix} \quad (25)$$

$\nu = 1,2,3,\ldots k,k+1.$

Definindo a matriz $\vec{S}$ como o produto das matrizes transferências e de fase na eq.25;

$$\vec{S} = ||s_{ij}|| = W_{01}\ U_1\ W_{12}\ U_2 \ldots\ W_{k-1/k}\ U_k\ W_{k/k+1}$$

podemos escrever a eq.25 como

$$\begin{vmatrix} E_{1R} \\ \\ E_{1L} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} \\ \\ s_{21} & s_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E'_{k+1/R} \\ \\ E'_{k+1/L} \end{vmatrix}$$

isto é, $\vec{S}$ transforma as componentes tangenciais dos campos através do sistema de múltiplas camadas.

Calculemos agora os coeficientes s_{ij}. Podemos computar as expressões das amplitudes de transmissão e reflexão, para ambas as direções da luz incidente. Para isto admitimos que $\vec{E}'_{k+1/L} = 0$. Logo teremos:

$$\vec{E}_{1R} = s_{11}\ \vec{E}_{k+1/R}$$

$$\vec{E}_{1L} = s_{21}\,\vec{E}'_{k+1/L}$$

como sabemos que

$$\vec{E}_{1R} = \varepsilon_{1R}\cos\theta_o \quad e \quad \vec{E}'_{k+1/R} = \varepsilon_{k+1/R}\cos\theta_{k+1} \rightarrow \frac{\vec{E}'_{k+1/R}}{\vec{E}_{1R}} = \frac{1}{s_{11}}$$

$$\frac{\varepsilon'_{k+1/R}}{\varepsilon_{1R}}\;\frac{\cos\theta_{k+1}}{\cos\theta_o} = \frac{1}{s_{11}} \rightarrow \frac{\varepsilon'_{k+1/R}}{\varepsilon_{1R}} = \frac{c_{o/k+1}}{s_{11}}$$

logo vamos ficar com

$$\vec{r}_R = \frac{\vec{E}_{1L}}{\vec{E}_{1R}} = \frac{s_{21}}{s_{11}} \tag{26a}$$

$$\vec{t}_R = \frac{\varepsilon'_{k+1/R}}{\varepsilon_{1R}} = \frac{c_{o/k+1}}{s_{11}} \tag{26b}$$

onde $c_{o/k+1}$ é a redução por obliquidade entre os meios exteriores.

Para o caso $\vec{E}_{1R} = 0$, teremos usando o mesmo procedimento acima

$$\vec{r}_L = \frac{\vec{E}'_{k+1/L}}{\vec{E}'_{1L}} = \frac{-s_{21}}{s_{11}} \tag{27a}$$

$$\vec{t}_L = \frac{\varepsilon_{1L}}{\varepsilon'_{k+1/L}} = \frac{c_{k+1/0}}{s_{11}}\det(\vec{S}) \tag{27b}$$

onde consideremos $\vec{S}$ como o produto das W's e U's e seu $\det(\vec{S})$ = $= Y_{k+1}\,Y_o^{-1}$.

1.3.6. Matriz interferência

Realizando o produto das matrizes de admitância pelas matrizes de fase na forma seguinte,

$$M_\nu = V_\nu U_\nu V_\nu^{-1}$$

$$M_\nu = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ Y_\nu & -Y_\nu \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \exp(i\phi_\nu) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_\nu) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & Y_\nu^{-1} \\ 1 & -Y_\nu^{-1} \end{vmatrix}$$

chegaremos na matriz

$$M_\nu = \begin{vmatrix} \cos(\phi_\nu) & \frac{i}{Y_\nu} \operatorname{sen}(\phi_\nu) \\ iY_\nu \operatorname{sen}(\phi_\nu) & \cos(\phi_\nu) \end{vmatrix} \qquad (28)$$

A essa matriz damos o nome de matriz interferência da ν-ésima camada, a qual será utilizada para cálculo computacional (ver cap . II). Nos definimos o sistema de matriz transferência pela expressão:

$$\overline{S} = V_o^{-1} \, \overline{M}_\nu \, V_{\nu+1} \qquad (29)$$

onde $\overline{M} = \pi M_\nu$ é o sistema de matriz interferência e $\overline{M} = M_1 M_2 \ldots M_\nu$ é o produto das matrizes de cada uma das camadas do sistema de múltiplas camadas em estudo. Geralmente M_1=H e M_2=L, portanto o produtório ficará da forma HLHLHLHL, o qual é conhecido como estrutura periódica. De acordo com o tipo de estrutura periódica calculamos os coatings que serão descritos no Cap.III. Na eq.29 V_o^{-1} matriz do meio de entrada (ar) e V_{k+1} matriz do substrato (vidro).

CAPÍTULO II

CÁLCULOS NUMÉRICOS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

2.1. Introdução

Estudaremos neste capítulo a física envolvida no problema de ótica de filmes finos, de interesse nesse trabalho. Para isto resolvemos dividí-lo em cinco seções composta de: cálculo das espessuras das camadas, cálculo do número de pares de camadas a serem depositada de acordo com o tipo de coating, cálculo de "R" e "T" tanto para sistema de múltiplas camadas dielétricas (MCD), quanto para sistemas de múltiplas camadas metálicas (MCM), tendo em vista desenvolvimento do método do cálculo de programas computacionais, que é uma outra seção em estudo neste capítulo. Também mostramos diagramas de blocos (fluxogramas) dos programas desenvolvidos por nós, pois nelas existem comentários importantes para o entendimento do método usado.

Em resumo, este capítulo tem como objetivo descrever e mostrar todos os cálculos numéricos e computacionais desenvolvidos para o estudo da ótica de filmes finos, mostrando todas as passagens físicas e matemáticas.

2.2. Cálculo das espessuras das camadas

Este estudo se encontra nas referências 3-4.

Temos a necessidade de ver como se calcula as espessuras das camadas de sistemas de múltiplas camadas, porque com ela é que saberemos como projetar um tipo qualquer de coating. Daí

sua importância, nesse trabalho. E para começar vejamos a figura 5 abaixo.

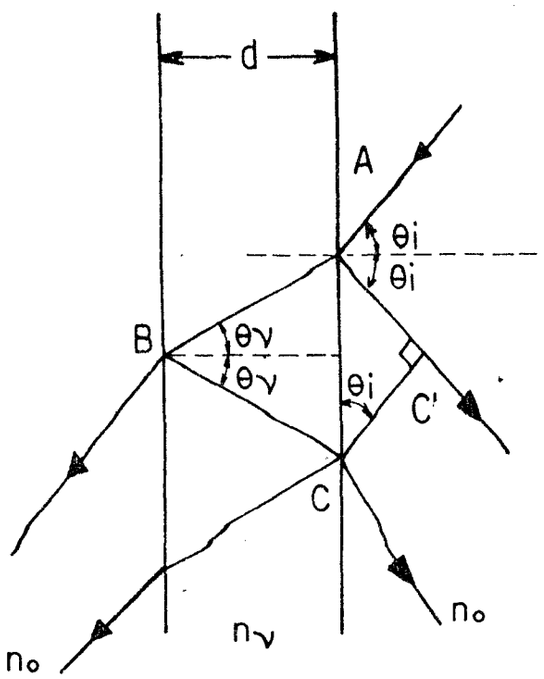


Fig.5 - Esquema mostrando a geometria para se calcular a espessura da ν-ésima camada.

Na figura 5 temos que para o ponto A, as ondas indicente, refletida, e transmitida são dados por:

$$i = E_o \exp(i\omega t)$$

$$r = \rho E_o \exp(i\omega t) \qquad (30)$$

$$t = \tau E_o \exp(i\omega t)$$

onde ρ = amplitude de reflexão e τ = coeficiente de transmissão , quando a onda é medida no meio 0 para o meio ν .

O campo elétrico é obtido tomando a parte real das equações 30, que para a onda incidente é expressa por:

$$\vec{E} = \vec{E}_o \cos(\omega t)$$

A onda transmitida em A experimenta um decrescimento de fase (is-

to ocorre porque $\exp[i(\omega t-kx)]$ adianta por uma distância Δx introduzindo um fator $\exp[-ik\Delta x]$ o qual dá o decrescimento de fase $k\Delta x$). Para onda se propagando de A para B temos

$$k_\nu \overline{AB} = k_\nu d/\cos\theta_\nu \qquad \text{onde} \quad k_\nu = \omega/\upsilon_\nu = \omega n_\nu$$

então no ponto B teremos a seguinte situação para as ondas incidentes e refletidas:

$$i = \tau E_o \exp[i(\omega t-k_\nu d/\cos\theta_\nu)]$$

$$r = \rho\tau E_o \exp[i(\omega t-k_\nu\ d/\cos\theta_\nu)] \tag{31}$$

Da passagem de B para C envolve a mesma perda de fase como de A para B. Então no ponto C, teremos para as ondas incidentes e transmitidas

$$i = \rho'\tau E_o \exp[i(\omega t-2k_\nu d/\cos\theta_\nu)]$$

$$t = \tau'\rho'\tau E_o \exp[i(\omega t-2k_\nu d/\cos\theta_\nu)] \tag{32}$$

onde τ' e ρ' são os coeficientes de transmissão e as amplitudes de reflexão quando a onda incidente é a do meio ν . A onda refletida original para o ponto A

$$k_o\overline{AC'} = k_o\overline{AC}\ \sin\theta_i = 2k_o d\ tg(\theta_\nu)\sin(\theta_i)$$

onde $k_o = \omega/\upsilon_o = \omega n_o$.

Então, para o ponto C', o campo elétrico complexo $\tilde{E}_1$ é obtido

$$\tilde{E}_1 = \rho\, E_o \exp(i\omega t)\exp(-2ik_\nu d\ tg\theta_\nu \sin\theta_i) \equiv$$

$$\equiv \rho\, E_o \exp(i\omega t)\exp(-i\phi_1) \tag{33}$$

e para o ponto C de 32 vem

$$\tilde{E}_2 = \tau\rho'\tau' E_o \exp(i\omega t)\exp(-2ik_\nu d/\cos\theta_\nu) \equiv$$

$$\equiv \tau\rho'\tau' E_o \exp(i\omega t)\exp(-i\phi_2) \tag{34}$$

sendo que essas equações definem ϕ_1 e ϕ_2 como sendo:

$$\phi_1 = 2k_o d\ tg\theta_\nu \sin\theta_i$$

e

$$\phi_2 = 2k_\nu d/\cos\theta_\nu \tag{35}$$

Se os dois raios estão no plano focal de lente eles interferem . Tal interferência é conhecida como fase relativa, Δ . Calculemos essa fase A fase relativa, Δ , de $\tilde{E}_1$ e $\tilde{E}_2$ nas equações (33) e (34) será

$$\Delta = \phi_2 - \phi_1 = 2d\{k_\nu/\cos\theta_\nu - k_o\ tg\theta_\nu \sin\theta_i\}$$

que após algumas identidades trigonométricas obtém-se

$$\Delta = \frac{4\pi d\ n_\nu}{\lambda_o} \cos\theta_\nu \tag{36}$$

A partir dessa fase relativa temos dois tipos de interferência:

1) Caso $\Delta=\pi$ a interferência é construtiva, e a eq.36 nos dá

$$d = \frac{\lambda_o}{4n_\nu \cos\theta_\nu} \tag{37}$$

que é a fórmula da espessura de ν-ésima camada.

2) Caso $\Delta=\frac{\pi}{2}$ a interferência é destrutiva.

2.3. Cálculo do número de pares de camadas

Os espelhos dielétricos são empilhamentos alternados de materiais de alto e baixo índice de refração. Com a finalidade de sabermos qual o número de pares de camadas envolvidas no espelho mostramos este pequeno cálculo algébrico simples. Para isto, utilizaremos a eq.28, no seguinte produto matricial, para o caso em $\phi=\pi/2$, ou seja, espessura $\lambda/4$. Veja expressão abaixo

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & i/YH \\ iYH & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & i/YL \\ IYL & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 1.52 \end{vmatrix}$$

para um empilhamento de camadas alternadas HL temos 2K vezes este valor, logo a refletividade ficará:

$$R = \left| \frac{1.52-(YL/YH)}{1.52+(YL/YH)} \right|^{2K} \tag{38}$$

A partir deste valor de R, e após alguma álgebra obtemos

$$K = \frac{1}{2} \ln \left[1.52 \frac{(1-\sqrt{R})}{(1+\sqrt{R})}\right] \ln \left[\frac{YL}{YH}\right] \tag{39}$$

onde K é o número de pares de camadas. Foi a partir das eqs.37 e 39, e usando FORTRAN IV que desenvolvemos o programa PESP. Ver descrição do método do cálculo desse programa abaixo.

2.4. Cálculo de "R" e "T" para sistemas de MCD.

Tendo em vista a produção dos filmes finos especializados que será descrito no capítulo seguinte, foi necessário investigarmos sobre esses cálculos, que agora passaremos a apresentar.

Nesta seção apresentamos os cálculos de duas maneiras : A primeira: de uma maneira breve, devido termos estudado no capítulo I na seção 1.3 (Ótica de camadas dielétricas).

Para este tipo de cálculo usaremos a seguinte equação matricial

$$M = \begin{vmatrix} \cos\phi_\nu & \frac{i}{Y_\nu}\sin\phi_\nu \\ iY_\nu\sin\phi_\nu & \cos\phi_\nu \end{vmatrix}$$

dada no capítulo I. Realizando este produto de matrizes, obtemos o valor de "R" pela expressão abaixo

$$R = \left| \frac{a}{b} \right|^2$$

onde a=c+id e b=e+if são números complexos. Para cálculo da transmissão, como se trata de sistemas MCD o valor de "T" será 1-R.

A partir dessa equação e usando alguns dados conhecidos, foi que desenvolvemos o programa PFIL, que será descrito na seção 2.6 abaixo.

A segunda: um modo alternativo do cálculo matricial para refletividade e transmissividade será mostrado nesta seção. Para isto, consideremos o vetor campo elétrico polarizado na dire -

ção paralela ao plano de incidência. A amplitude do vetor campo elétrico de uma onda propagando-se na direção positiva do eixo-z na k-ésima camada especificaremos por E_k^+ e na direção negativa por E_k^-, E_{kx} e H_{ky} identificarão, respectivamente, as componentes tangenciais dos vetores campo elétrico e campo magnético da k-ésima camada.

Nesta teoria usaremos como ponto de referência[1,5,6]. A figura 2.6 mostra a notação que será utilizada agora.

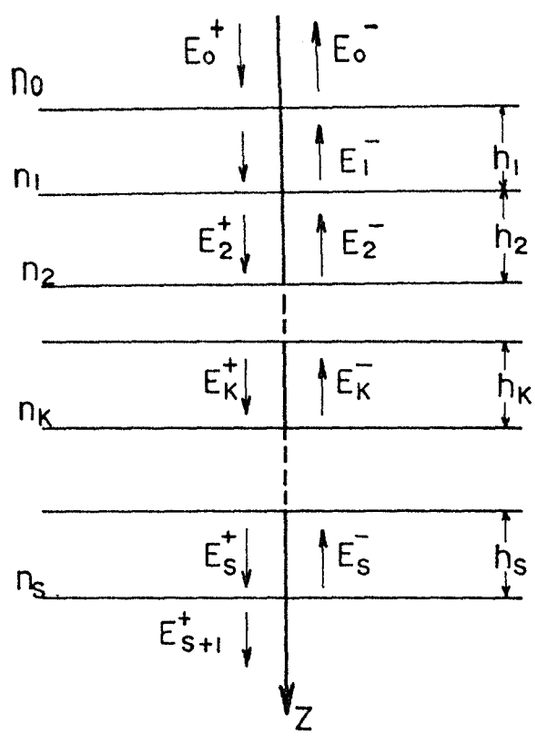


Fig.2.6. Esquema de filmes finos de sistemas de múltiplas camadas.

Usando as eqs.17 para a k-ésima camada, podemos escrever os campos como sendo:

$$E_{kx} = E_k^+ \exp\left[(-\, i2\pi/\lambda) n_k z_k\right] + E_k^- \exp\left[(i2\pi/\lambda) n_k z_k\right] \qquad (40)$$

$$H_{ky} = \{E_k^+ \exp\left[(-i2\pi/\lambda) n_k z_k\right] - E_k^- \exp\left[(i2\pi/\lambda) n_k z_k\right]\} n_k$$

Fazemos a origem na primeira superfície de separação entre os dois

meios, a k-ésima superfície, que separa as camadas k-1 e k está situada em relação ao eixo-z no ponto

$$z_k = \sum_{i=1}^{k-1} h_i \tag{41}$$

E lembrando a condição de contorno que as componentes tangenciais dos vetores campo elétrico e campo magnético são contínuas na superfície de separação entre dois meios, podemos fazer

$$E_{k-1x} = E_{kx} \tag{42}$$

$$H_{k-1y} = H_{ky}$$

então reescrevemos a eq.40 acima, na forma seguinte

$$E^+_{k-1}\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right] + E^-_{k-1}\exp\left[(i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right] =$$

$$= E^+_k\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_k z_k\right] + E^-_k \exp\left[(i2\pi/\lambda)n_k z_k\right] \tag{43}$$

$$n_{k-1}\{E^+_{k-1}\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right] - E^-_{k-1}\exp\left[(i2\pi/\lambda)\times\right.$$

$$\left.\times n_{k-1}z_{k-1}\right]\} = n_k\{E^+_k\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_k z_k\right] -$$

$$- E^-_k \exp\left[(i2\pi/\lambda)n_k z_k\right]\}$$

Se multiplicarmos a primeira das eqs.43 por n_{k-1} e somarmos e subtrairmos estas eqs. encontraremos

$$E^+_{k-1}\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right] = \{E^+_k\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_k z_k\right] +$$

$$+(n_{k-1}-n_k)/(n_{k-1}+n_x)E^-_k\exp\left[(i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_1\right]\}(n_{k-1}+n_k)/2n_{k-1} \tag{44}$$

$$E^-_{k-1}\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right] = \{(n_{k-1}-n_k)/(n_{k-1}+n_k)E^+_k \times$$

$$\times\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_k z_k\right] + E^-_k\exp\left[(i2\pi/\lambda)n_k z_k\right]\}(n_{k-1} +$$

$$+ n_k)/2n_{k-1}$$

onde dessas eqs. definimos os coeficientes de Fresnel como sendo

$$r_k = \frac{n_{k-1}-n_k}{n_{k-1}+n_k} \qquad (45)$$

$$t_k = \frac{2n_{k-1}}{n_{k-1}+n_k}$$

agora substituindo as eqs.45 nas eqs.44 e como $z_k=z_{k-1}+h_{k-1}$, ficamos com

$$E^+_{k-1}\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right]\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}h_{k-1}\right]=$$

$$=\left[E^+_k\exp(-i\delta_{k-1}) + r_k E^-_k \exp(i\delta_{k-1})\right]/t_k \qquad (46)$$

$$E^-_{k-1}\exp\left[(i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right]\exp\left[(i2\pi/\lambda)n_{k-1}h_{k-1}\right] =$$

$$=\left[r_k E^+_k\exp(-i\delta_{k-1}) + E^-_k\exp(i\delta_{k-1})\right]/t_k$$

Nessas equações definimos

$$\delta_{k-1} = (2\pi/\lambda)n_k z_{k-1} \quad \text{e} \quad \delta_k=(2\pi/\lambda)n_{k-1}h_{k-1} \qquad (47)$$

$$E^+_{k-1}\exp\left[(-i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right]= \varepsilon^+_{k-1}$$

$$E^-_{k-1}\exp\left[(i2\pi/\lambda)n_{k-1}z_{k-1}\right] =\varepsilon^-_{k-1}$$

usando essas definições acima, podemos escrever finalmente

$$\varepsilon^{+}_{k-1} = \left[\varepsilon^{+}_{k}\exp(i\delta_{k-1}) + r_k \varepsilon^{-}_{k} \exp(i\delta_{k-1})\right] / t_k \tag{48}$$

$$\varepsilon^{-}_{k-1} = \left[r_k \varepsilon^{+}_{k}\exp(-i\delta_{k-1}) + \varepsilon^{-}_{k} \exp(-i\delta_{k-1})\right]/t_k$$

sendo que essa última eq.se escreve na seguinte forma matricial

$$\begin{vmatrix} \varepsilon^{+}_{k-1} \\ \\ \varepsilon^{-}_{k-1} \end{vmatrix} = \frac{1}{t_k} \begin{vmatrix} \exp(i\delta_{k-1}) & r_k\exp(i\delta_{k-1}) \\ \\ r_k\exp(-i\delta_{k-1}) & \exp(-i\delta_{k-1}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon^{+}_{k} \\ \\ \varepsilon^{-}_{k} \end{vmatrix} \tag{49}$$

Para um sistema de k camadas figura 6 queremos conhecer a relação entre ε^{+}_{k-1} e ε^{+}_{o} assim como entre ε^{-}_{o} e ε^{+}_{o} de maneira que possamos obter a refletividade e a transmissividade. Para isto chamamos M_k a matriz

$$M_k = \begin{vmatrix} \exp(i\delta_{k-1}) & r_k\exp(i\delta_{k-1}) \\ \\ r_k\exp(-i\delta_{k-1}) & \exp(-i\delta_{k-1}) \end{vmatrix} \tag{50}$$

com isto feito, podemos reescrever a eq.49 na forma seguinte

$$\begin{vmatrix} \varepsilon^{+}_{k-1} \\ \\ \varepsilon^{-}_{k-1} \end{vmatrix} = \frac{M_k}{t_k} \begin{vmatrix} \varepsilon^{+}_{k} \\ \\ \varepsilon^{-}_{k} \end{vmatrix} \tag{51}$$

usando o método indutivo pode-se concluir a partir da eq.51 que

$$\begin{vmatrix} \varepsilon^{+}_{o} \\ \\ \varepsilon^{-}_{o} \end{vmatrix} = \frac{M_1 M_2 M_3 \ldots M_{k+1}}{t_1 t_2 t_3 \ldots t_{k+1}} \begin{vmatrix} \varepsilon^{+}_{k+1} \\ \\ \varepsilon^{-}_{k+1} \end{vmatrix}$$

Observamos que no meio k+1 não existem ondas propagando-se para a esquerda. Então $\varepsilon^-_{k+1}=0$ e as relações que queremos, podem ser obtidas da forma seguinte:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon^+_o \\ \\ \varepsilon^-_o \end{vmatrix} = \frac{M_1 M_2 M_3 \ldots M_{k+1}}{t_1 t_2 t_3 \ldots t_{k+1}} \begin{vmatrix} \varepsilon^+_{k+1} \\ \\ 0 \end{vmatrix} \qquad (52)$$

Este método matricial exposto acima visa principalmente o cálculo que será dado na seção seguinte.

2.5. Cálculo de "R" e "T" para sistema MCM

Tendo em vista a produção de filtros interferenciais MDM ou ADI é que nos levou a este tipo de cálculo, para isto a seguinte teoria será apresentada. Nesta seção mostramos algumas das passagens físicas e matemáticas importantes para o entendimento da mesma.

Como é sabido para os metais devemos introduzir um índice de refração que será um número complexo, devido ao termo de absorção que surge neste tipo de material. Nestes cálculos para maiores detalhes, ver referências 3,6,7,8.

Usando a figura 31 para sistema MCM e utilizando as eqs. 50 e 44 acima, escreveremos os índices de refração complexas para as camadas s e s-1 na forma seguinte

$$\eta_s = n_s - iK_s$$

$$\eta_{s-1} = n_{s-1} - iK_{s-1} \qquad (53)$$

com isto os coeficientes de Fresnel eq.44 serão complexos, e ex -

pressos da forma abaixo

$$r_s = g_s + ih_s$$

$$t_s = 1+g_s+ih_s \tag{54}$$

combinando as eqs.53 e 54 vem

$$r_s = \frac{n_{s-1}-n_s+i(K_s-K_{s-1})}{n_{s-1}+n_s-i(K_s+K_{s-1})} \tag{55}$$

$$t_s = \frac{2(n_{s-1}-iK_{s-1})}{n_{s-1}+n_s-i(K_s+K_{s-1})}$$

comparando as eqs.54 com 55 encontramos que

$$g_s = \frac{n_{s-1}^2+K_{s-1}^2-n_s^2-K_s^2}{(n_{s-1}+n_s)^2+(K_{s-1}+K_s)^2} \tag{56}$$

$$h_s = \frac{2(n_{s-1}K_s-n_sK_{s-1})}{(n_{s-1}+n_s)^2+(K_{s-1}+K_s)^2}$$

Devido as camadas serem metálicas elas absorvem e da eq.50 temos que

$$\delta_s = \frac{2\pi}{\lambda}\eta_s d = \frac{2\pi}{\lambda}(n_s-iK_s)d \tag{57}$$

ou

$$\delta_s = \gamma_s - i\alpha_s$$

onde

$$\gamma_s = \frac{2\pi}{\lambda} n_s d \qquad \text{e} \qquad \alpha_s = \frac{2\pi}{\lambda} K_s d \tag{58}$$

Assim os elementos da matriz M na eq.50 ficarão:

$$e^{i\delta_{s-1}} = e^{\alpha_{s-1}} e^{i\gamma_{s-1}}$$

E poderemos escrever a matriz da camada s,M, na forma seguinte

$$(M_s) = \begin{vmatrix} e^{\alpha_{s-1}} e^{i\gamma_{s-1}} & r_s e^{\alpha_{s-1}} e^{i\gamma_{s-1}} \\ r_s e^{-\alpha_{s-1}} e^{-i\gamma_{s-1}} & e^{-\alpha_{s-1}} e^{-i\gamma_{s-1}} \end{vmatrix} \tag{59}$$

Usando o fato de que $e^{i\gamma_{s-1}} = \cos\gamma_{s-1} + i\,\mathrm{sen}\gamma_{s-1}$, podemos reescrever a eq.59 na forma

$$(M_s) = \begin{vmatrix} P_s + iQ_s & R_s + iS_s \\ T_s + iU_s & V_s + iW_s \end{vmatrix} \tag{60}$$

onde temos que

$$\begin{aligned}
P_s &= e^{\alpha_{s-1}} \cos\gamma_{s-1} \\
Q_s &= e^{\alpha_{s-1}} \sin\gamma_{s-1} \\
R_s &= e^{\alpha_{s-1}} (g_s \cos\gamma_{s-1} - h_s \sin\gamma_{s-1}) \\
S_s &= e^{\alpha_{s-1}} (h_s \cos\gamma_{s-1} + g_s \sin\gamma_{s-1}). \\
T_s &= e^{-\alpha_{s-1}} (g_s \cos\gamma_{s-1} + h_s \sin\gamma_{s-1}) \\
U_s &= e^{-\alpha_{s-1}} (h_s \cos\gamma_{s-1} - g_s \sin\gamma_{s-1}) \\
V_s &= e^{-\alpha_{s-1}} \cos\gamma_{s-1} \\
W_s &= -e^{-\alpha_{s-1}} \sin\gamma_{s-1}
\end{aligned} \tag{61}$$

Por indução podemos escrever os elementos da matriz produto $(M_1)(_2)\ldots(M_{s+1}) = (M)_T$ na forma

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP
FÍSICA

$$(M)_T = \begin{vmatrix} P_{1,s+1} + iQ_{1,s+1} & R_{1,s+1} + iS_{1,s+1} \\ T_{1,s+1} + iU_{1,s+1} & V_{1,s+1} + iW_{1,s+1} \end{vmatrix} \qquad (62)$$

Desta forma utilizamos a notação, sem ambiguidade, $(M_1)(M_2)\ldots(M_{s+1}) \rightarrow (M_1)(M_{s+1})$ na teoria de sistemas múltiplas camadas. Podemos escrever portanto

$$(M_1)(M_{s+1}) = (M)_T \qquad (63)$$

onde seus elementos serão dados por

$$\begin{aligned}
P_{1,s+1} &= P_{1s}\, P_{s+1} - Q_{1s}\, Q_{s+1} + R_{1s}\, T_{s+1} - S_{1s}\, U_{s+1} \\
Q_{1,s+1} &= Q_{1s}\, P_{s+1} + P_{1s}\, Q_{s+1} + S_{1s}\, T_{s+1} + R_{1s}\, U_{s+1} \\
R_{1,s+1} &= P_{1s}\, R_{s+1} - Q_{1s}\, S_{s+1} + R_{1s}\, V_{s+1} - S_{1s}\, W_{s+1} \\
S_{1,s+1} &= Q_{1s}\, R_{s+1} + P_{1s}\, S_{s+1} + S_{1s}\, V_{s+1} + R_{1s}\, W_{s+1} \qquad (64) \\
T_{1,s+1} &= T_{1s}\, P_{s+1} - U_{1s}\, Q_{s+1} + V_{1s}\, T_{s+1} - W_{1s}\, U_{s+1} \\
U_{1,s+1} &= U_{1s}\, P_{s+1} + T_{1s}\, Q_{s+1} + W_{1s}\, T_{s+1} + V_{1s}\, W_{s+1} \\
V_{1,s+1} &= T_{1s}\, R_{s+1} - U_{1s}\, S_{s+1} + V_{1s}\, V_{s+1} - W_{1s}\, W_{s+1} \\
W_{1,s+1} &= U_{1s}\, R_{s+1} + T_{1s}\, S_{s+1} + W_{1s}\, V_{s+1} + V_{1s}\, W_{s+1}
\end{aligned}$$

Finalmente a partir das eqs.52 e 62 calculamos a refletividade e transmissividade como sendo da forma

$$R = \frac{(\varepsilon_o^-)(\varepsilon_o^-)^*}{(\varepsilon_o^+)(\varepsilon_o^+)^*} = \frac{(T_{1,s+1})^2 + (U_{1,s+1})^2}{(P_{1,s+1})^2 + (Q_{1,s+1})^2} \tag{65}$$

$$\tau = \frac{(\varepsilon_{s+1}^+)(\varepsilon_{s+1}^+)^*}{(\varepsilon_o^+)(\varepsilon_o^+)^*} = \frac{(t_1 t_2 \ldots t_{s+1})(t_1^* t_2^* \ldots t_{s+1}^*)}{(P_{1,s+1})^2 + (Q_{1,s+1})^2}$$

Partindo dos cálculos acima e usando FORTRAN IV desenvolvemos o programa FMED (filtro Metal-Dielétrico-Metal), o qual será descrito na seção 2.6.

2.6. Descrição do método do cálculo computacional

Nesta seção tentaremos descrever os programas por nós desenvolvidos de acordo, com os cálculos dados na seção anterior. Para isto, dividimos em três programas que chamamos 1) PESP, 2)PFIL e 3) FMED. A finalidade desses programas é projetar e graficar os filmes finos especializados que serão descritos no capítulo III. Para entendermos o método usado nesses programas foi que resolvemos mostrar um fluxograma de cada um desses, pois neles existem comentários explicativos do que foi feito.

Passamos agora a descrever esses métodos de cálculos dos programas.

2.6.1. Método do cálculo do programa PESP

Nesse programa usamos a figura 7, a qual mostra um diagrama em bloco (fluxograma) do Programa PESP.FOR. Nele são dados os parâmetros iniciais (Dimension, data, byte, etc). Depois vem a leitura dos valores nas equações 37 e 39 fornecidos para o tipo de coating, em seguida a fórmula do $\cos\theta_\nu$ (ν=H ou L) que através de

comando ELSE e ENDIF selecionam o tipo de polarização s ou p, de acordo com as equações 19a e 19b. Por último vem a realização do cálculo das espessuras das camadas e do número de pares de camadas bem como a seus respectivos valores escritos no vídeo, terminando assim o programa.

Uma listagem desse programa é dada no apêndice 1, para melhor acompanhamento do método exposto.

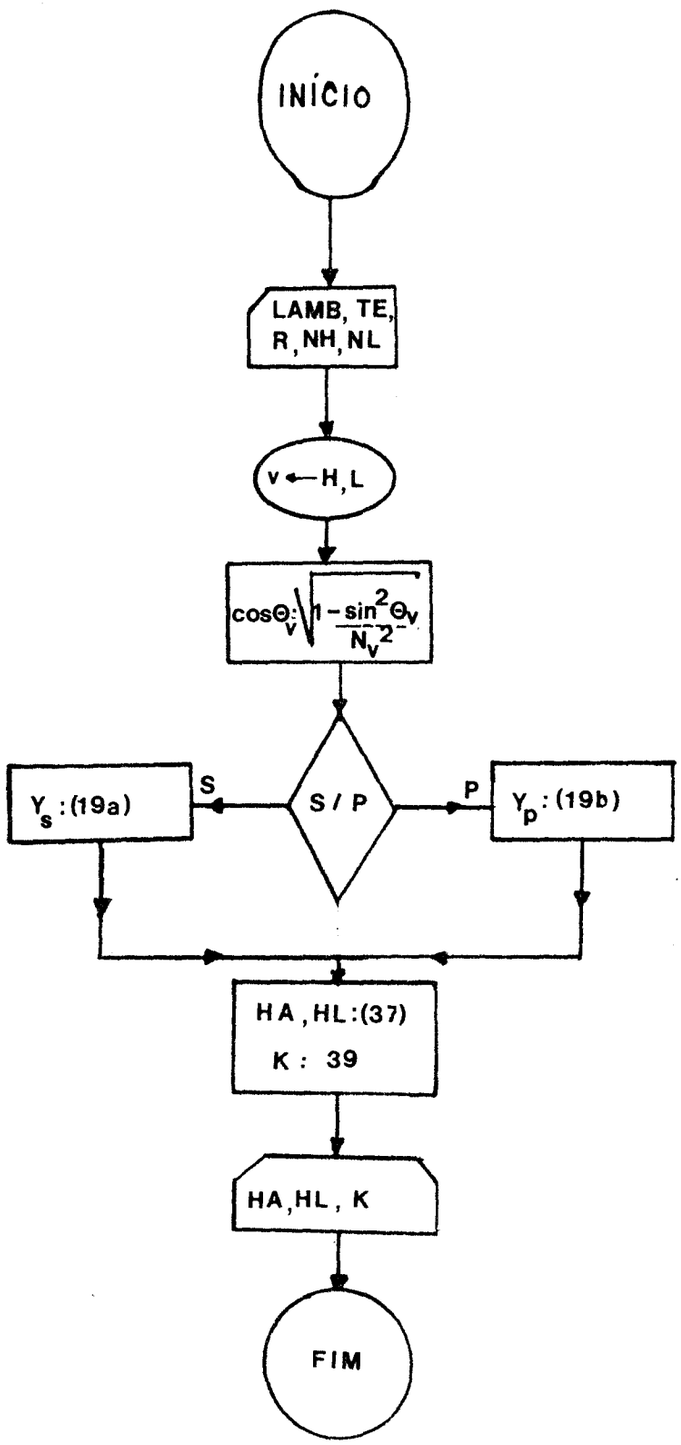
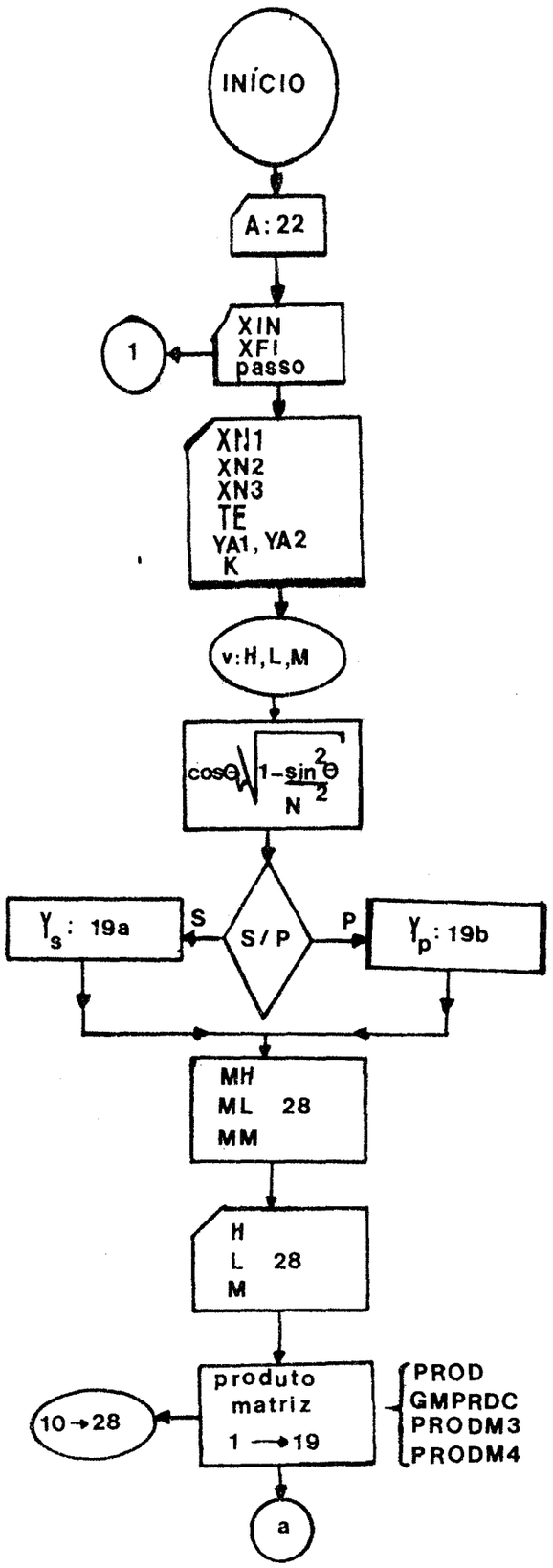


Fig.7- Fluxograma do método do cálculo do programa PESP, FOR.

II.6.2. Método do cálculo do programa PFIL

Neste programa utilizamos o fluxograma da figura 8, para mostrar o método de desenvolvimento. O método usado foi entrada de dados (INICIO), leitura de dados da matriz no meio ar ($A=V_o^{-1}$) da eq.22, leitura XIN (λin), XFI(λf), PASSO(step). Depois da leitura dos valores de entradas conhecidos (XN1(n_H), XN2(n_L), XN3(n_M) , TE(θ_ν), Ya1(n_H $h_H=\lambda/4$), YA2(n_H $h_H=\lambda/8$) e K(nº de camadas). Com esses dados lidos, calculamos $\cos\theta_\nu = \sqrt{1. -\sin^2\theta_i/n_\nu^2}$, onde ν=H,L ou M, para selecionar o tipo de polarização através do comando ELSE e ENDIF que utilizam as equações 19a e 19b, com isto feito càlculamos os elementos das matrizes M_H, M_L, M_M (eq.28), geramos as matrizes H=B1, L=B2, 0.5H=B3=aux2, 0.5L=B4=aux2 ou vice versa. Depois escolhemos a sequência desejada para cada produto de matriz utilizando as subroutinas PRODM, GMPRDC, PRODM3 e PRODM4, onde todas equações possuem comando GO TO 29 saindo resultado em AUX. Gero a matriz do substrato (vidro) $E=V_{k+1}$ (22). Realizo o produto de AUX pela matriz E e resultado calcula a refletividade em função do comprimento de onda. Vale ressaltar que antes desse cálculo existem três comandos IF; o primeiro se quero escrever TABELA[S(Y)/N] dos valores de "R" e "λ" calculados, o segundo se quero PLOTAR[S(Y)/N] o gráfico de "R(λ)" desses valores calculados e o terceiro se quero CONTINUAR[S/N], se nesse último respondo S(Y) vai para o início 1 e começa-se tudo outra vez, mas se respondo N vai para o fim do programa.

Para acompanhamento do fluxograma veja a listagem do programa PFIL.FOR no apêndice 2.


INÍCIO
A: 22
XIN
XFI
passo
1
XN1
XN2
XN3
TE
YA1, YA2
K
v: H, L, M
$\cos\theta\sqrt{1-\frac{\sin^2\theta}{N^2}}$
S
S / P
P
Y_s: 19a
Y_p: 19b
MH
ML 28
MM
H
L 28
M
produto
matriz
1 → 19
10 → 28
PROD
GMPRDC
PRODM3
PRODM4
a

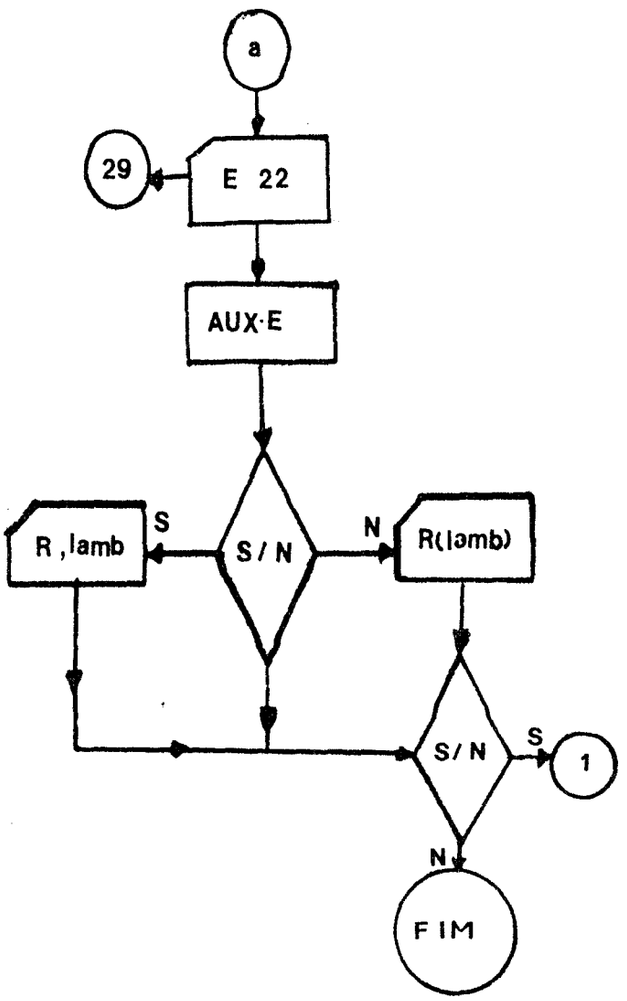


Fig.8 - Fluxograma do método do cálculo do programa PFIL. FOR.

2.6.3. Método do cálculo do programa FMED

O método desenvolvido para o programa FMED é mostrado na figura 9 através do seu fluxograma, o qual vemos que são dados os parâmetros de início (Dimension, data, common,etc), leitura de cartão com os valores armazenados nos arquivos MDM.dat ou PRA.dat , onde estão escritos λ,nl,kl,n2,k2 em forma de tabela tirados das referências[9,2]. O programa ler os arquivos e chama a subroutina INTERP referência[10], para calcular os novos valores interpolados de λi,nli,kli,n2i,k2i os quais serão lidos e armazenados, para cálculo dos novos λ's,R's,τ's, e A's através da chamada da subroutina FILMED, que utiliza as expressões 56,58,61,65 para plotar o gráfico da transmissão em função do comprimento de onda, onde temos um comando IF com [S(Y)/N] para PLOT (arquivo FOR004.dat) se respondo

S(Y) e um arquivo PRINT.lis com os valores dos λ's. R's,τ's e A's em forma de tabela se respondo N. E finalmente temos o FIM do programa.

Para maiores detalhes do método ver listagem desse programa FMED.FOR no apêndice 3.

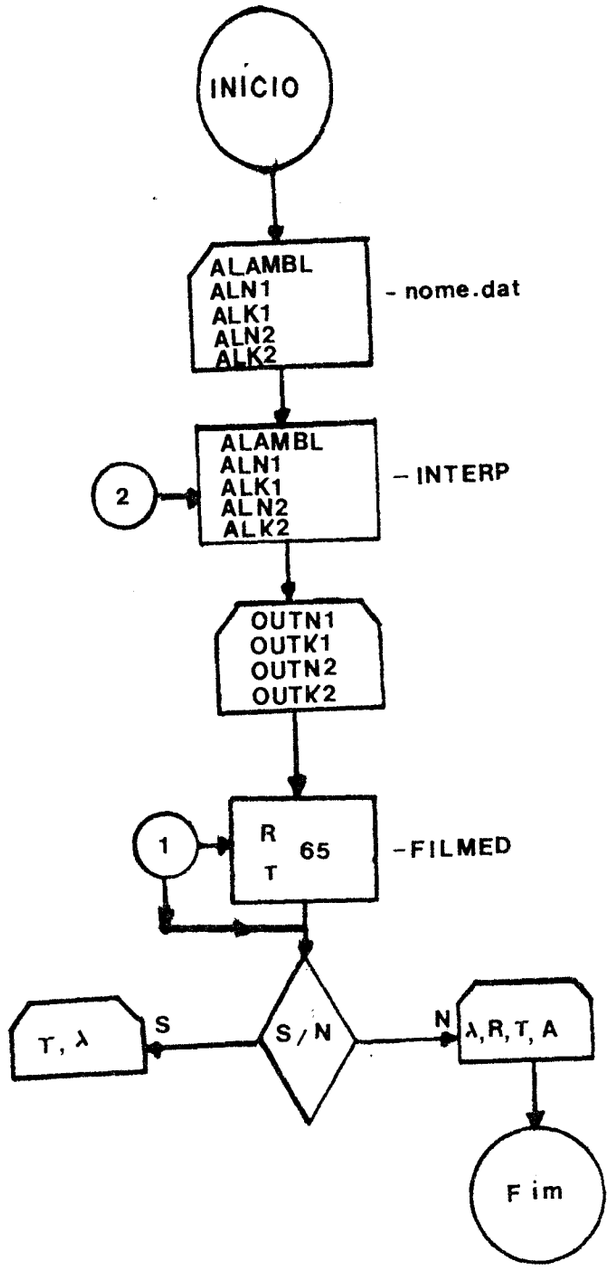
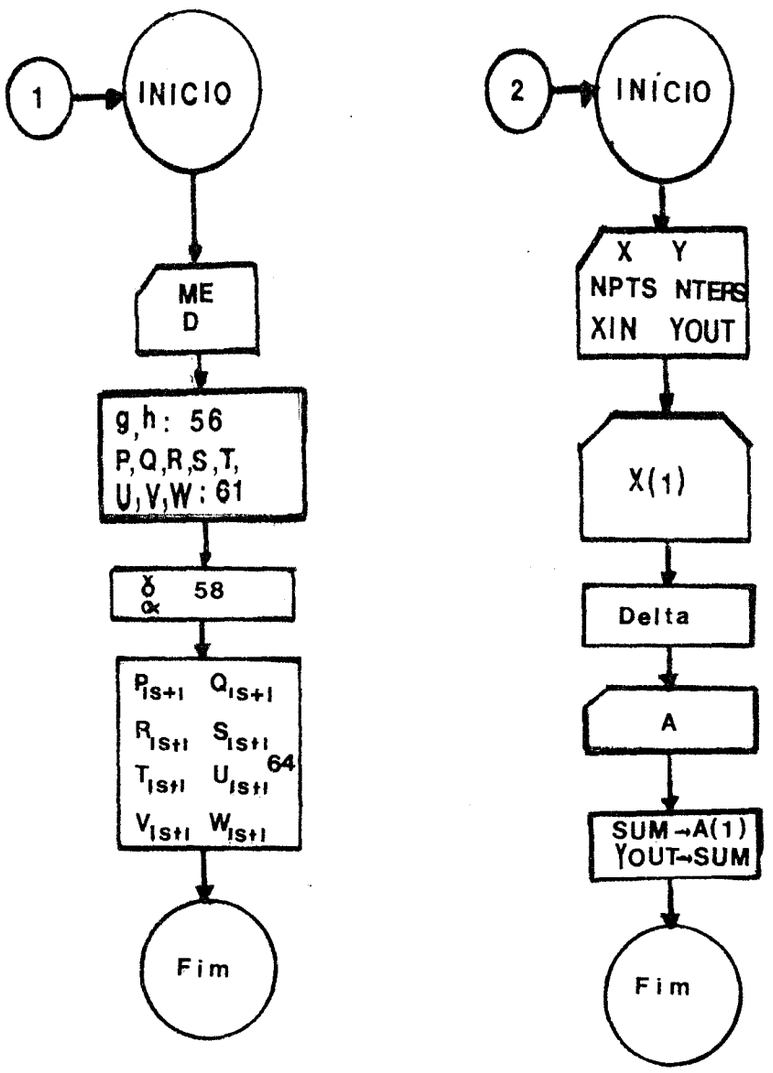


Fig.9 - Fluxograma do método do cálculo do programa FMED.FOR.

Nas figuras 10a e 10b mostramos os fluxogramas das su - broutinas FILMED e INTERP, respectivamente



(a) (b)

Fig.10 - Fluxogramas da subroutina FILMED (a) e da su - broutina INTERP (b).

CAPÍTULO III

FILMES FINOS ESPECIALIZADOS

3.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever os principais tipos de coatings, que são utilizados em componentes óticos de alta precisão. Mostramos também as características físicas de cada um desses tipos de coatings, desenvolvidos através de programas construídos no capítulo II, e instalados no VAX-11 do DFCM. Passaremos a descrever os coatings de uso mais comum em ótica de filmes finos, tendo em vista a sua utilização neste trabalho, ou seja, a produção desses componentes óticos de alta precisão.

3.2. Coating ANTI-REFLETOR

Quando a luz atravessa a interface entre o ar e componentes óticos, tais como lentes ou prismas, uma fração do feixe é refletido na superfície (≈4,5%). Esta reflexão diminue a transmissão do componente ótico e produz uma falsa imagem.

A utilização de coatings ANTI-REFLETOR, praticamente elimina essas falsas imagens e aumenta a transmissão destes componentes óticos. Por essas razões esses coatings apresentam aplicações das mais diversas em componentes de ótica de precisão. Os coatings anti-refletores podem ser de uma, duas ou três camadas.

3.2.1. Coating ANTI-REFLETOR com uma camada

Neste tipo de coating anti-refletor a condição para refletividade zero (100% de transmissão) é que

$$N_1 = \sqrt{N_o \; n_s} \qquad (66)$$

e que o ângulo de fase seja igual a $\pi/2$ (para termos interferência construtiva).

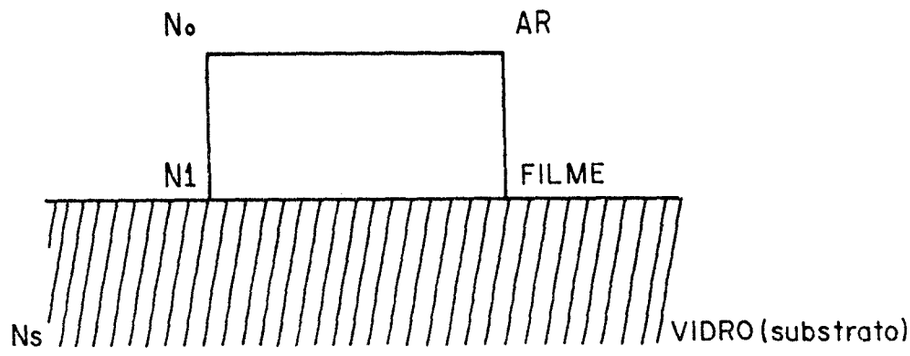


Fig.11 - Ilustra o coating ANTI-REFLETOR com uma camada.

Para incidência normal a condição $\phi=\pi/2$ implica em $N_1H_1 = \lambda/4$ (interferência construtiva) para o caso em que N_o=1,0 (AR) e N_s=1.52 (VIDRO), que é o que estamos interessados, temos da condição 66 que

$$N_1 = \sqrt{1.52} = 1.23$$

para o índice do material a ser depositado, o qual não se encontra na natureza. Os dois materiais mais próximos encontrados são MgF_2 (1.38) e Na_3AlF_6 (1.35). Utilizando esses materiais no coating a reflexão na interface se reduz para aproximadamente 1%. A figura 12 mostra o gráfico do coating anti-refletor de MgF_2(n=1.38) com uma camada obtida através do programa PFIL (sequência 1 com K=1 , YA1=4.,YA2=1.,XN1=1.38, XN2=1.38,XN3=1., TE=0.).

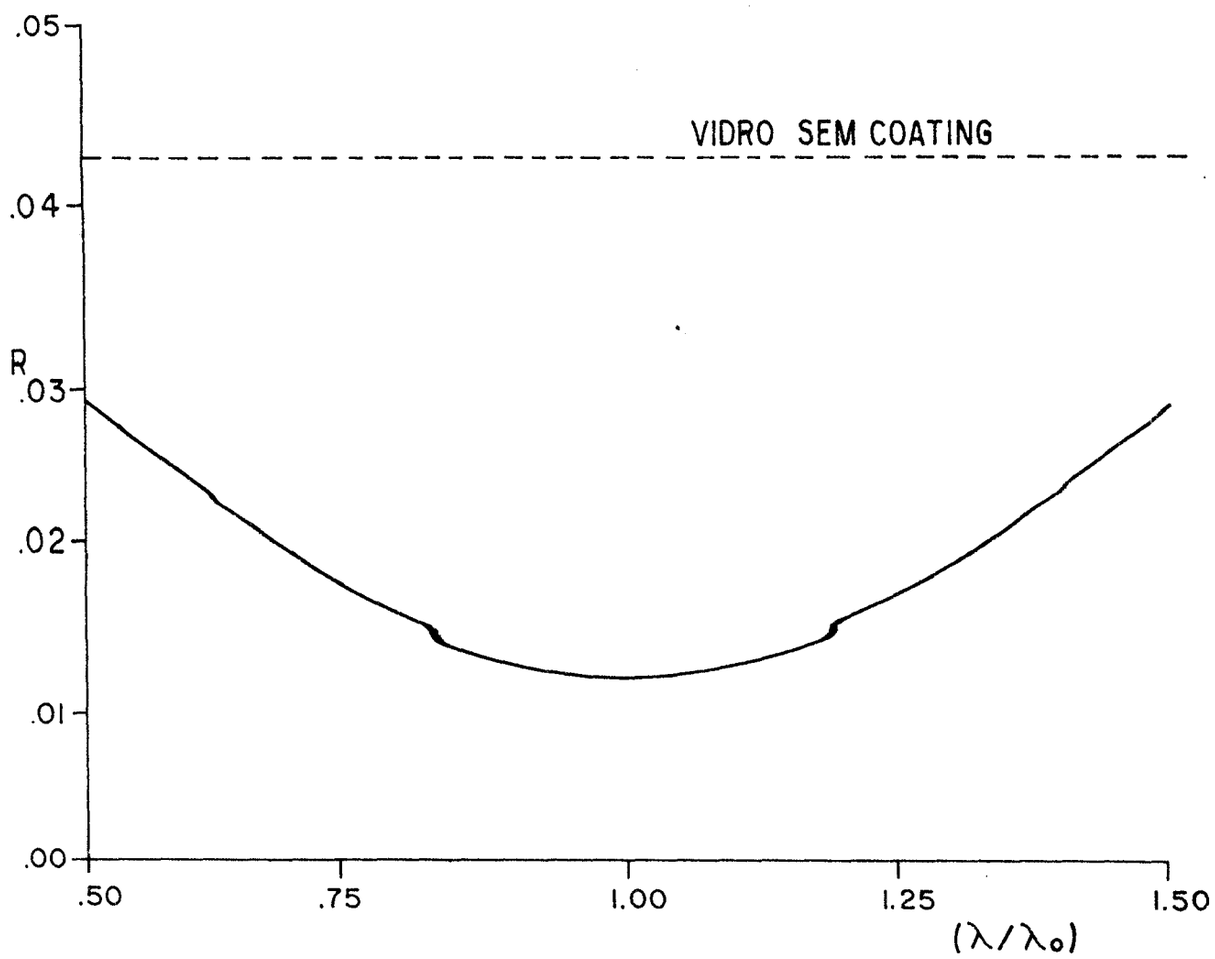


Fig.12 - Curva teórica do "coating" anti-refletor com uma camada de MgF_2.

3.2.2. Coating ANTI-REFLETOR com duas camadas

Neste tipo de coating temos que, para as espessuras $\lambda/4$-$\lambda/4$ a condição de reflectância zero é que

$$\frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{N_s}{N_o}} \qquad (67)$$

onde N_2 é o índice de refração do material próximo ao substrato (N_s, normalmente vidro) e N_1 o índice do material adjacente ao meio incidente (N_o, normalmente por ar). Quanto aos materiais disponíveis para evaporação a condição (67)é mais flexível que a equivalente para uma camada (66).

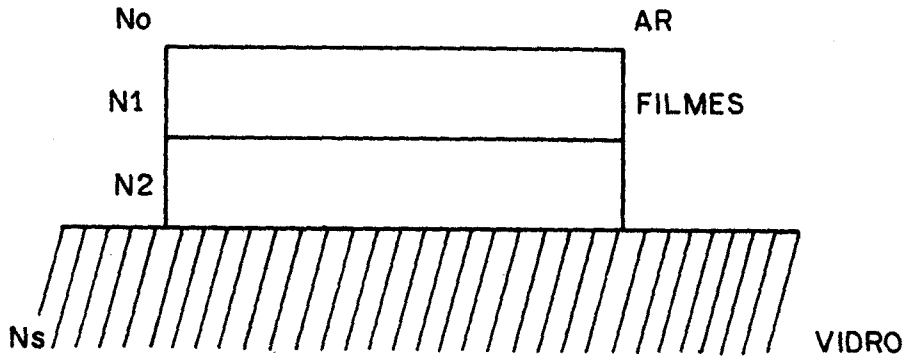


Fig.13 - Ilustração do coating anti-refletor com duas camadas.

Para incidência normal a condição $\phi=\pi/2$ implica $N_1h_1 = N_2h_2 = \lambda/4$. MgO($N_2$=1.70) e MgF_2(N_1=1.38) são materiais que satisfazem a condição (67) com N_s=1.51 (vidro) e N_o=1.0 (ar). Para maiores detalhes veja as referências[11,12].

O coating anti-refletor de duas camadas podem também ser feito com duas camadas de espessuras $\lambda/4$-$\lambda/2$. As figuras 14 e 15 mostram as diferenças existentes entre os coatings anti-refletor com duas camadas de espessuras $\lambda/4$-$\lambda/4$ e $\lambda/4$-$\lambda/2$, respectivamente, calculado utilizando o programa PFIL descrito no capítulo II.

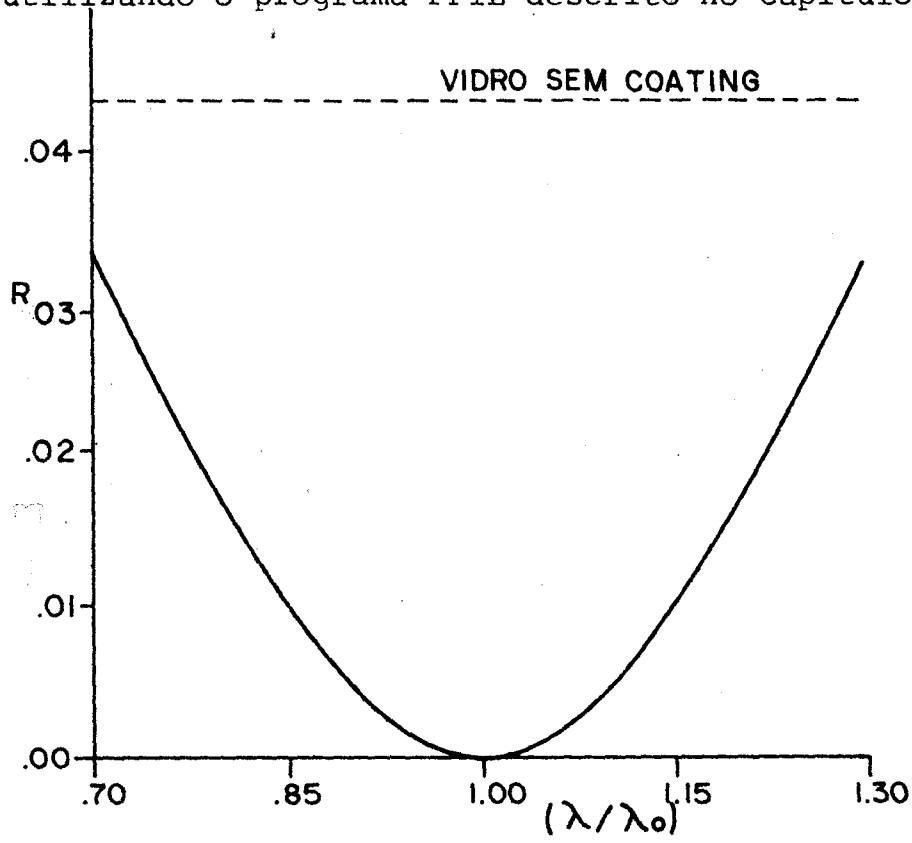


Fig.14- Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para o coating anti-refletor com duas camadas ($\lambda/4$-$\lambda/4$) N_1=1.38, N_2=1.70.

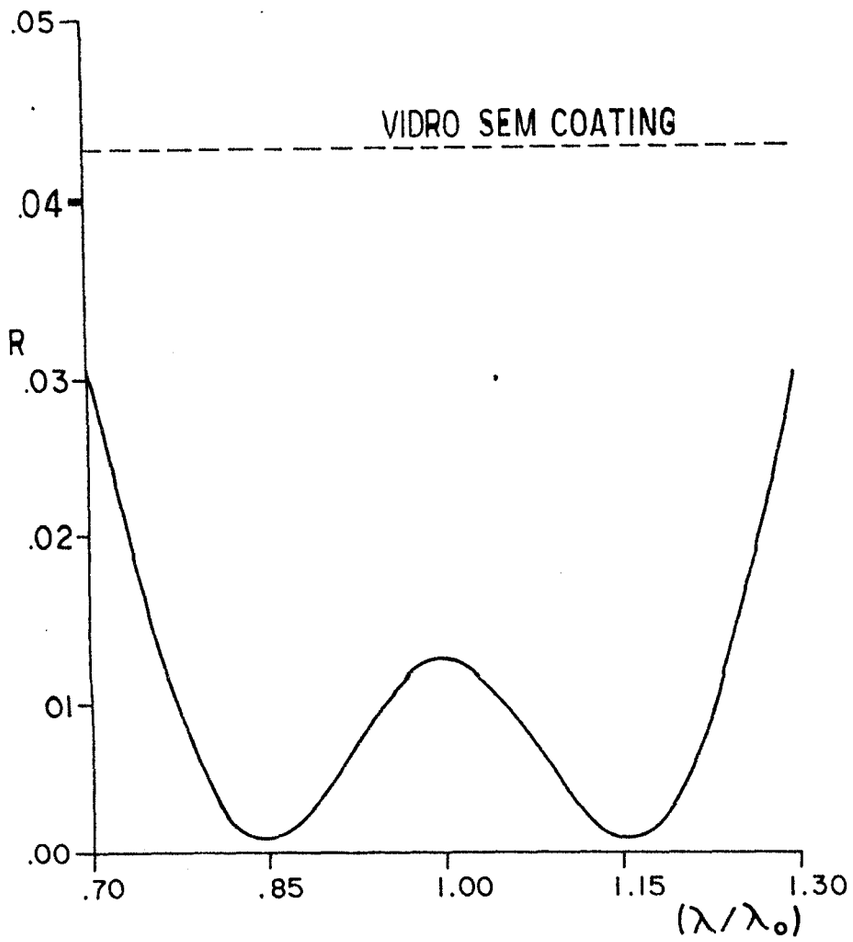


Fig.15- Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para o coating anti-refletor com duas camadas $(\lambda/4-\lambda/2)N_1=1.38$, $N_2=1.70$.

ATÉ AQUI

3.2.3. Coating ANTI-REFLETOR com três camadas

Neste coating temos seis parâmetros que podem variar: os três índices e as três espessura. Podemos então ter vários tipos de coating. Como por exemplo podemos ter o coating $\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$ que terá reflectância menos que 0,1% na região inteira do visível.

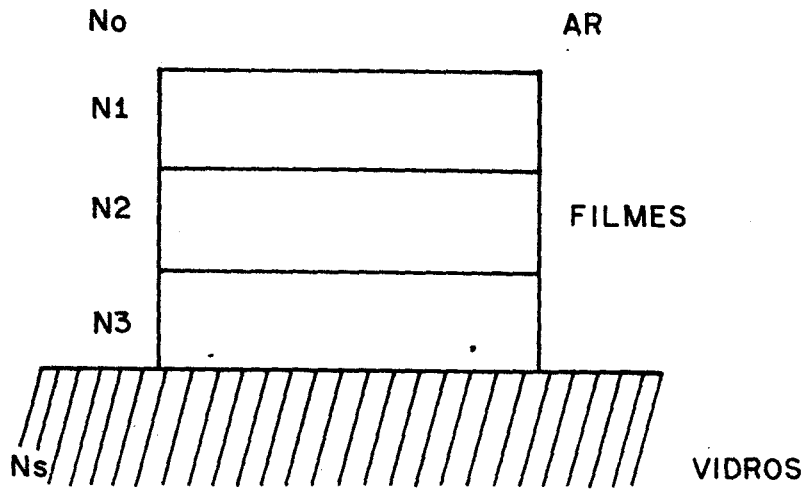


Fig.16 - Ilustração do coating anti-refletor com três camadas de espessuras $\lambda/4-\lambda/4-\lambda/4$

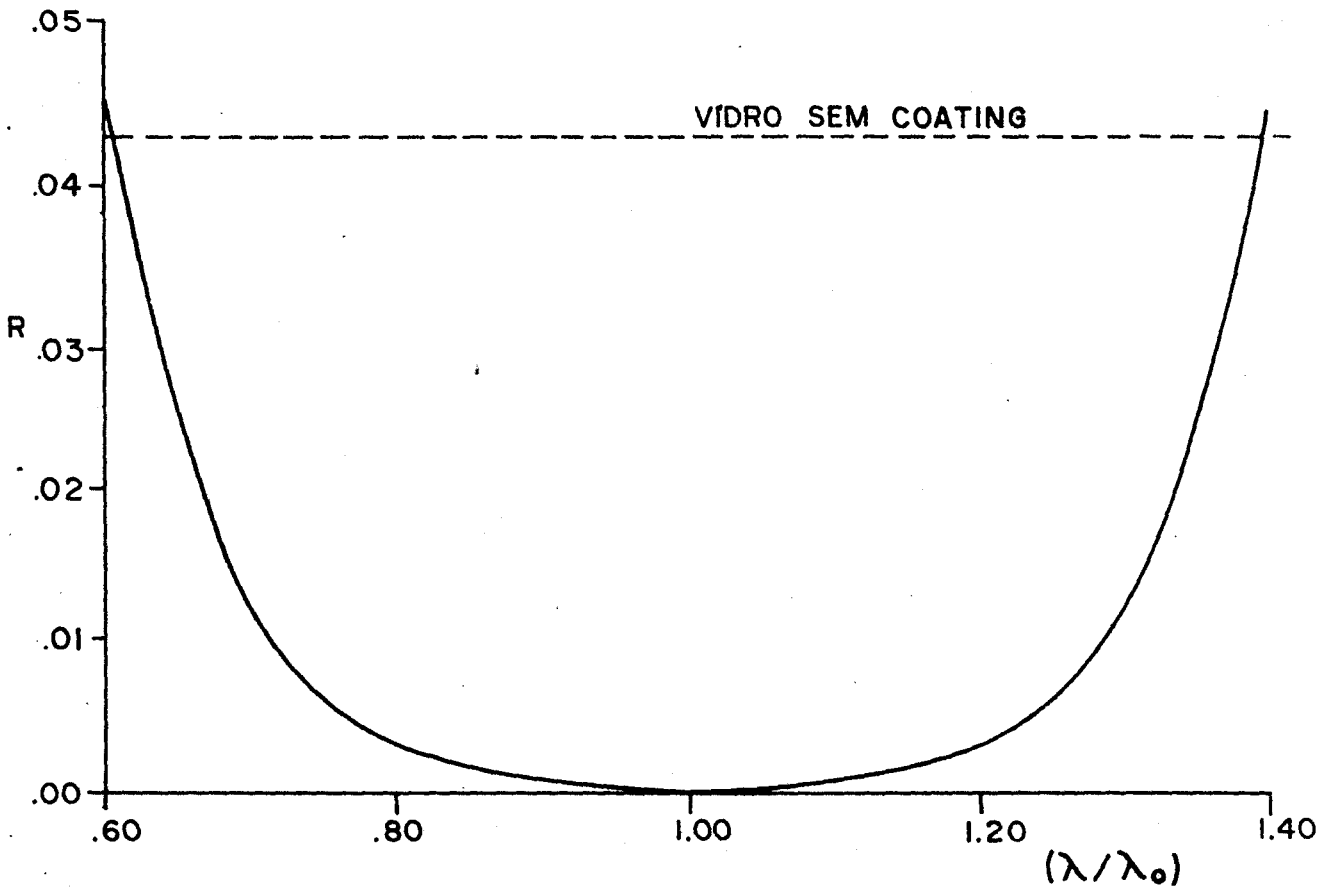


Fig.17 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para o coating anti-refletor com três camadas ($\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$) com $N_1=1.38$, $N_2=2.30$ e $N_3=1.70$.

Para detalhes a este assunto veja referência[13].

Os materiais normalmente utilizados neste coating são : $N_1 = 1.38 (MgF_2)$, $N_2 = 2.3 (Ti_2O_3)$ e $N_3 = 1.7 (MgO)$ ou (AL_2O_3). Podemos também ter coating $\lambda/4-\lambda/2-3\lambda/4$ o qual dá reflectâncias igualmente inferior a 0.1% em todo o espectro visível como mostrado na figura 18.

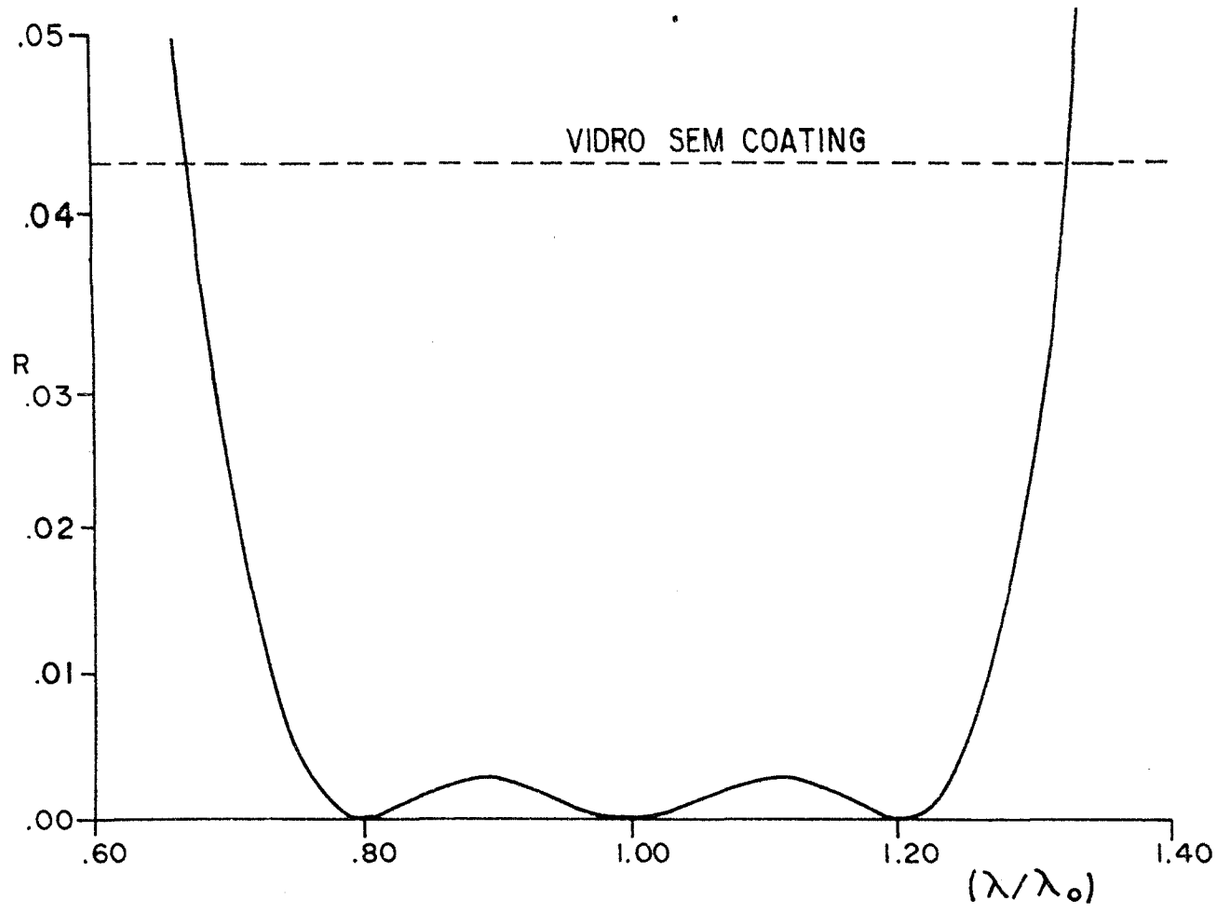


Fig.18 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para o coating anti-refletor com três camadas $(\lambda/4-\lambda/2-3\lambda/4)$ com $N_1=1.38$, $N_2 = 2.30$ e $N_3 = 1.70$.

3.3. Espelhos dielétricos de alta refletividade

Este componente ótico é largamente utilizado atualmente em substituição aos espelhos metálicos, tais como de Ag ou Al que tem refletividade em torno de 95%, devido a absorção interna dos metais. Para obtermos refletividade maior que este valor são utilizados os espelhos dielétricos. Esta ALTA REFLETIVIDADE é muito im-

portante na construção de cavidades óticas (principalmente para LASER e Fabri-Perot) e no manuseio de LASERS de alta potência.

Espelhos de alta refletividade são empilhamentos de múltiplas camadas dielétricas de um quarto de onda ($\lambda/4$), com índices de refração alternados baixo e alto (conhecida como estrutura periódica). A teoria do coating se baseia no produto das matrizes de interferência demonstrado nos capítulos I e II, onde M é dado por:

$$M = \begin{vmatrix} \cos(\phi) & (i/Y)\sin(\phi) \\ iY\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{vmatrix} \qquad (68)$$

onde M=L para o material de índice de refração baixo e M=H para o de índice de refração alto. Desta forma teremos um empilhamento do tipo:

vidro/HLHLHLHL/ar o qual representamos por:

$V/(HL)^4/A$

onde 4 número de pares de camadas, V substrato de vidro e A meio incidente ar.

De uma maneira geral temos:

$V/(HL)^K/A$

A refletividade aumenta quando aumentamos o número de pares de camadas (K). Exemplo NH=1.38(MgF_2), NL= 2.30(ZnS), NHHH = = NLHL =$\lambda/4$, N_s= 1.52, N_o= 1.00, $R_{max.}$= 85% para K=3 e $R_{máx.}$= 95% para K=5.

A figura 19 mostra um esquema de visualização para um empilhamento $\lambda/4$.

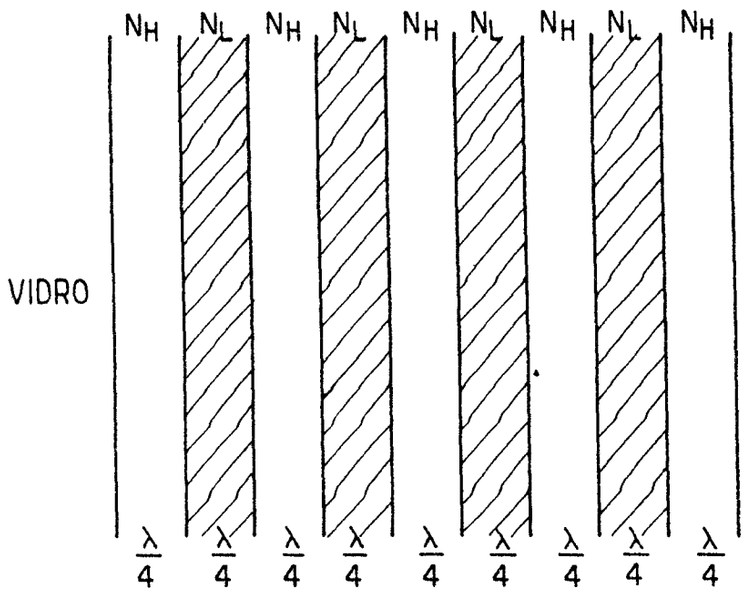


Fig. 19 - Esquema do empilhamento $\lambda/4$.

Nas figuras 20,21 e 22, mostramos as características físicas de espelhos de alta refletividade por nós calculados pelo programa PFIL.FOR, descrito no capítulo anterior.

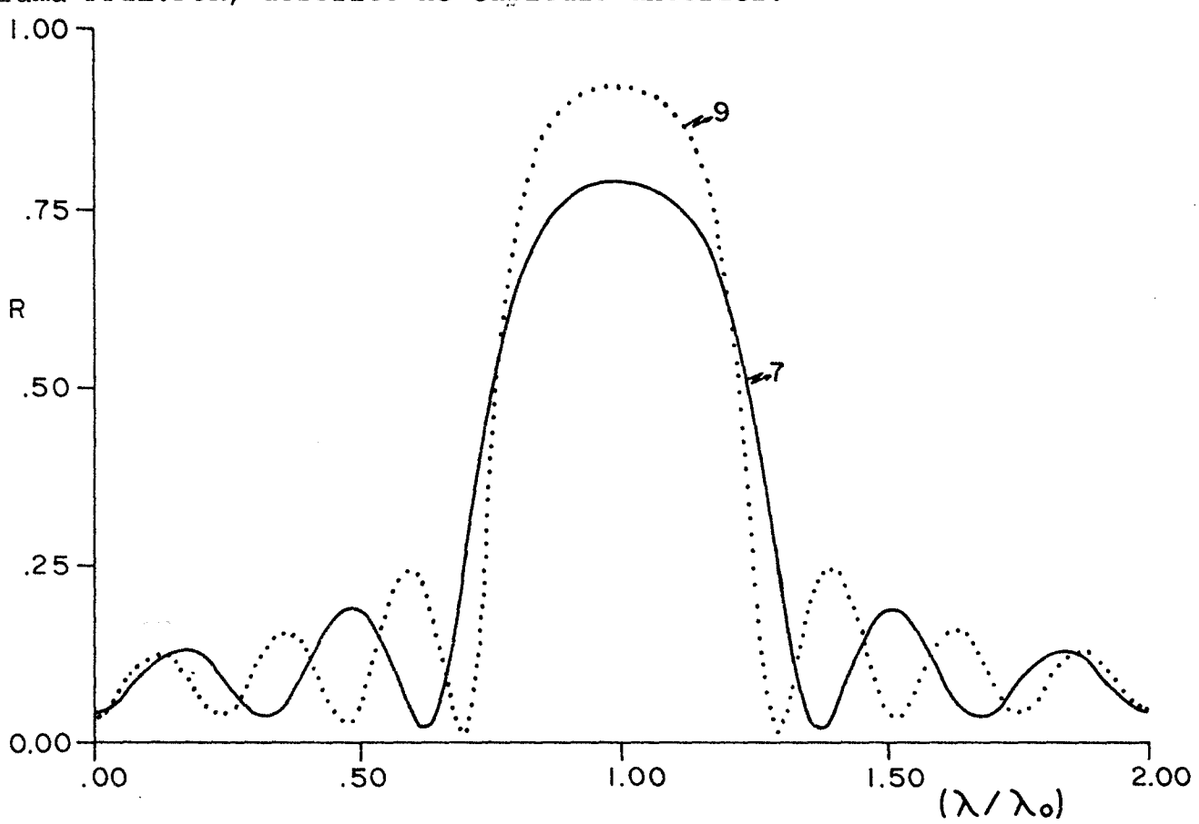


Fig.20 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para espelhos de alta refletividade com 7 e 9 camadas, respectivamente, com NH=2.3(Ti_2O_3) e NL= 1.45(SiO_2).

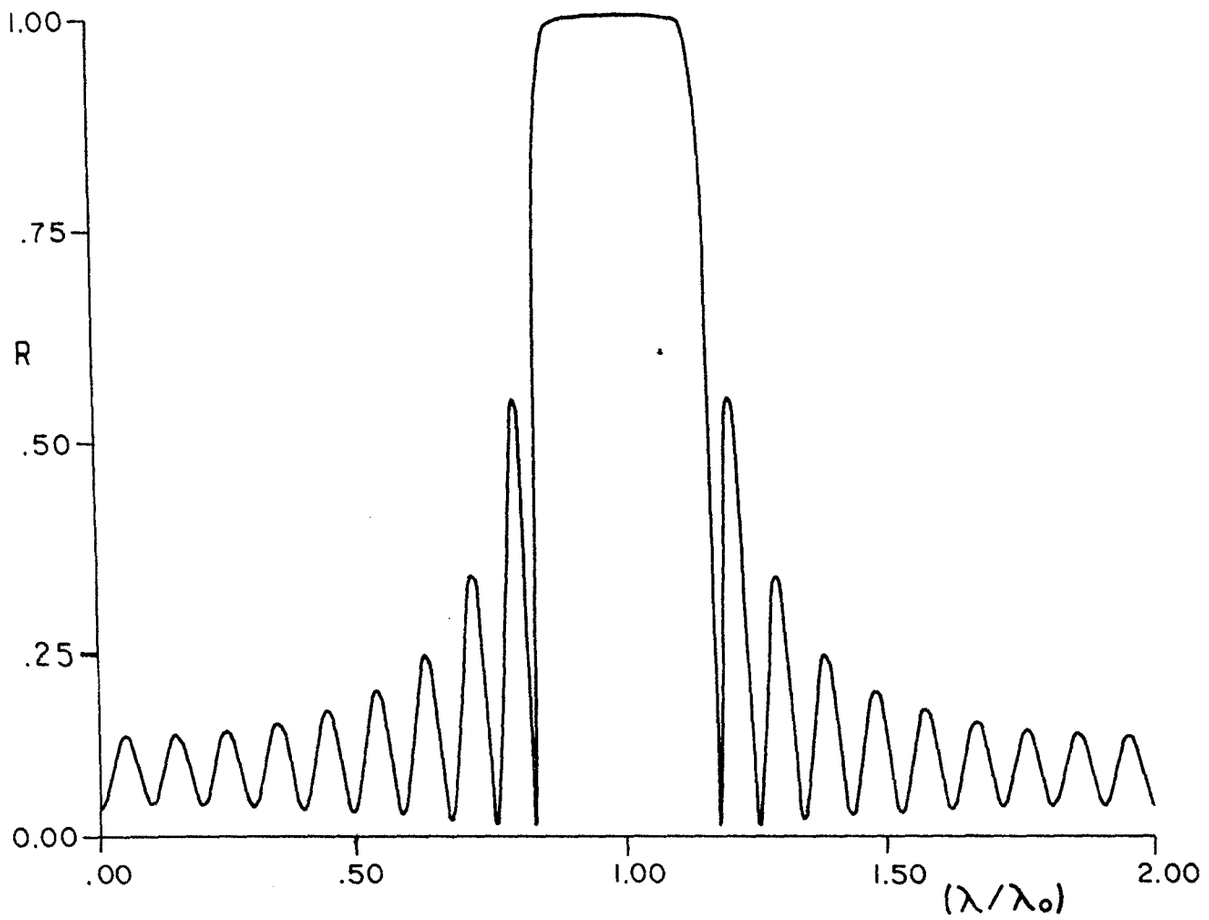


Fig.21 - Curva Teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para espelho de alta refletividade de banda larga (23 camadas) projetado com NH=2.30 e NL= 1.45.

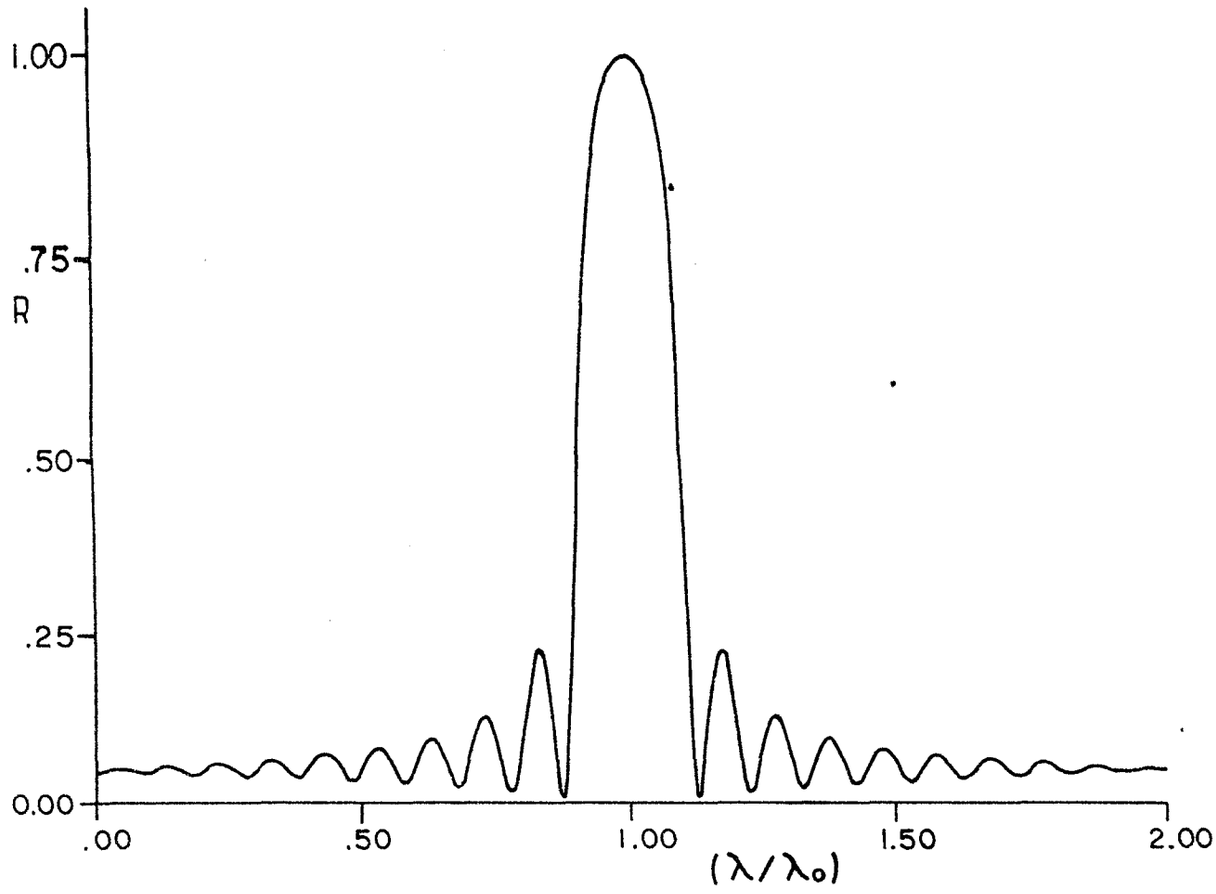


Fig.22 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para espelho de alta refletividade de banda estreita (23 camadas) projetado a partir de empilhamento de materiais com NH = = 1.70 e NL = 1.38 e espessura λ/4.

3.4. Filtros passa-banda

Um filtro passa-banda é um coating que tem a propriedade de transmitir uma parte do espectro e refletir a outra. Esses filtros podem ser classificados em:

a - filtro passa baixo

b - filtro passa alto

Para visualizarmos estes tipos de filtros mostramos na figura 23 uma idealização dos espectros de transmissão de cada um desses filtros.

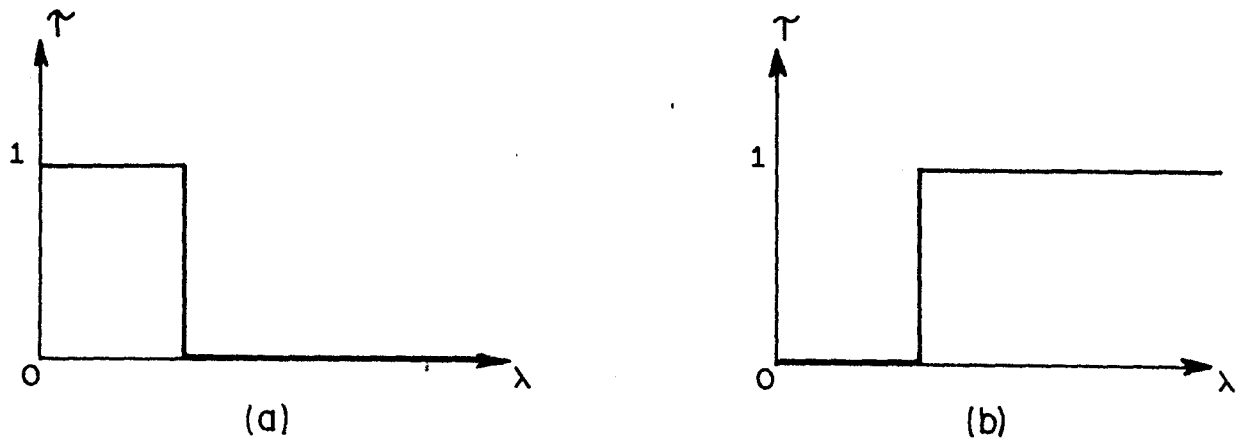


Fig.23 - Esquema protótipo para filtros passa baixo (a) e filtros passa alto (b).

Esses filtros são também conhecidos como filtros de corte. Os empilhamentos utilizados para tais filtros são do tipo:

$V/(\frac{H}{2})(LH)^K L(\frac{H}{2})/A$ ou $V/(\frac{H}{2}\ L\ \frac{H}{2})K/A$ para filtros passa alto.

$V/(\frac{L}{2})(HL)^K H(\frac{L}{2})/A$ ou $V/(\frac{L}{2}\ H\ \frac{L}{2})^K/A$ para filtros passa - baixo.

onde para H NHHH = $\lambda/4$ e para 0.5H NHHH = $\lambda/8$.

para L NLHL = $\lambda/4$ e para 0.5L NLHL = $\lambda/8$.

Para projetarmos e graficarmos tais tipos de coating usamos sempre as sequências 5 ou 11 do programa PFIL.FOR. Na figura

24 mostramos um esquema protótipo para esses filtros.

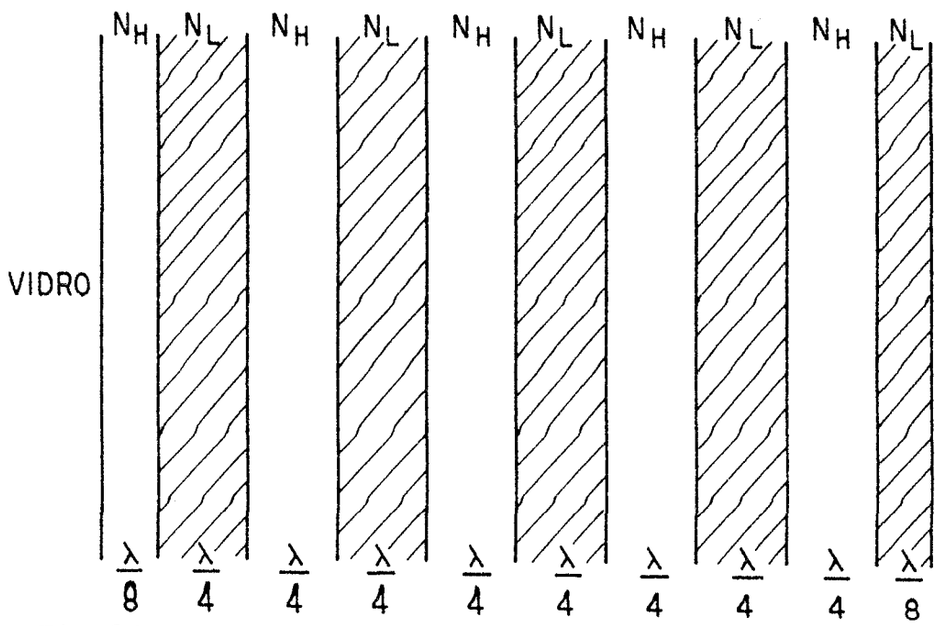


Fig.24 - Esquema de empilhamento $\lambda/8-\lambda/4-\ldots\lambda/4-\lambda/8$ para filtro passa banda.

Baseado no cálculo feito no capítulo II, mostraremos a refletividade para esses filtros nas figuras 25 e 26.

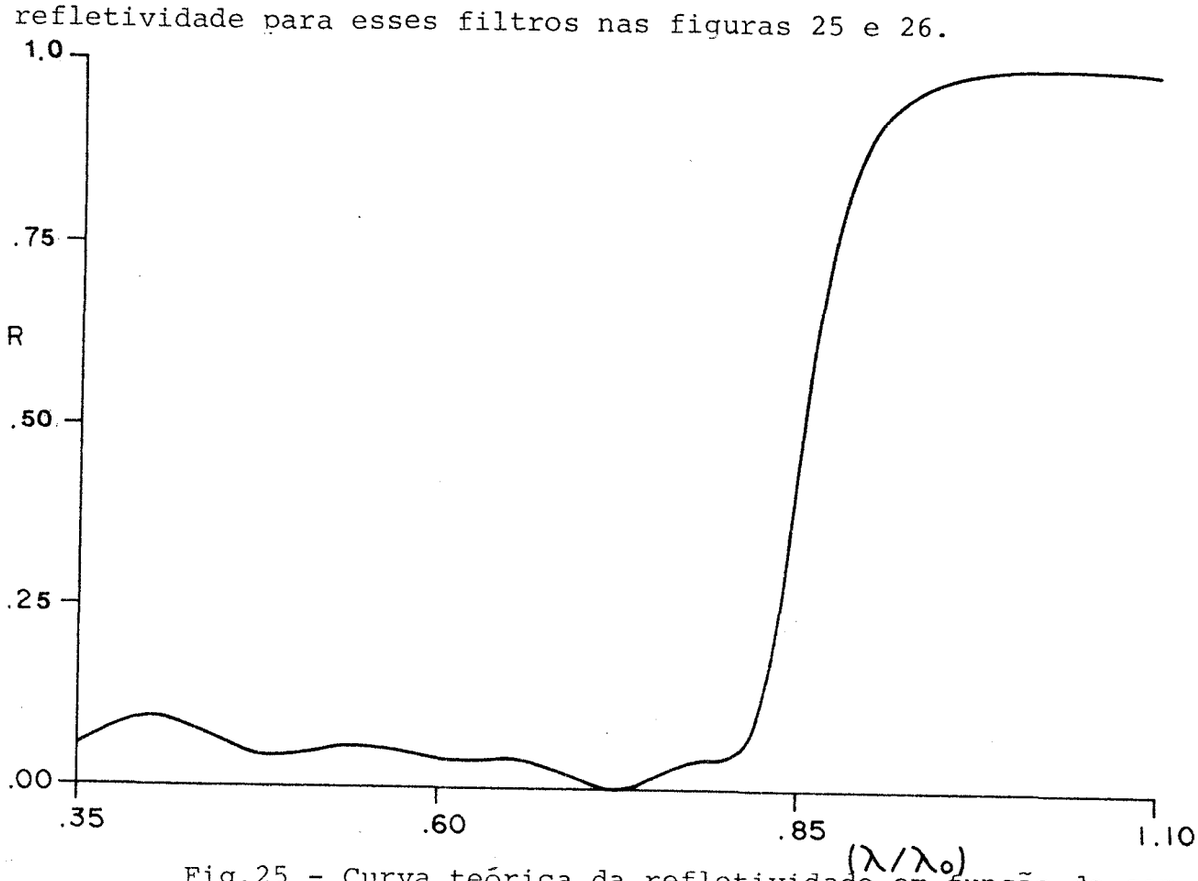


Fig.25 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para um filtro passa baixo obtido a partir do programa PFIL.FOR, sequência 5 ou 11, k=10, NH=2.30 e NL=1.45.

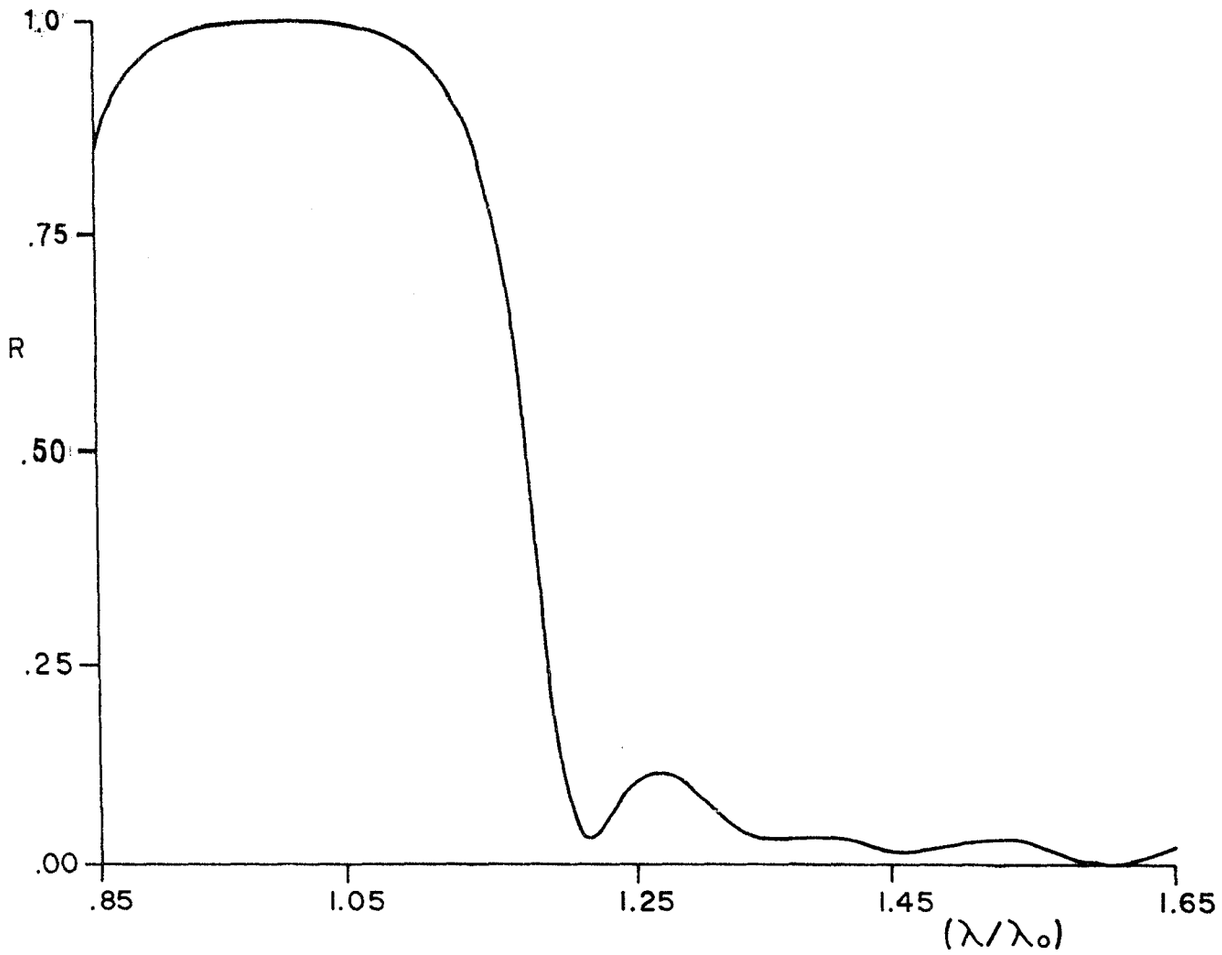


Fig.26 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para um filtro passa alto obtido a partir do programa PFIL.FOR, sequência 5 ou 11, K=10, NH=2.30 e NL=1.45.

3.5. Filtro passa-banda estreita

Um filtro passa banda estreita, é um coating que tem a propriedade de transmitir apenas uma pequena região do espectro (ordem de alguns angstrons) e refletir as outras. Esses filtros são conhecidos como filtros de interferência, e são utilizados para selecionar um dado comprimento de onda em sistemas espectrofotométricos. Os filtros de interferência mais comum são do tipo

a) metal-dielétrico-metal (MDM)

b) todo dielétrico (ADI)(A do inglês all)

Para visualizarmos melhor este tipo de filtros mostramos a figura 27.

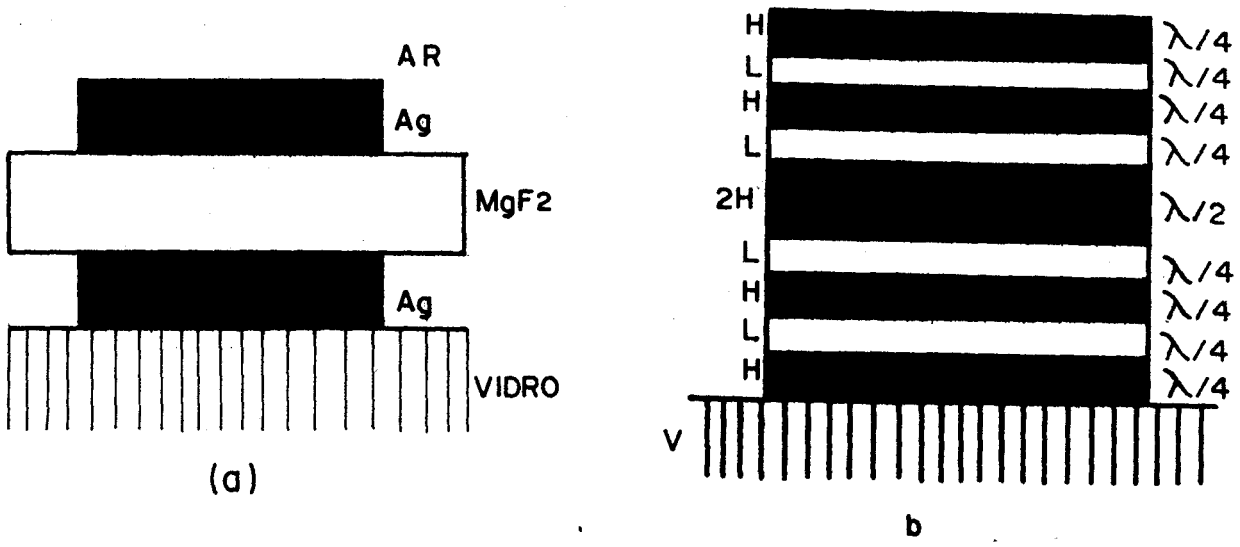


Fig.27 - Esquema de filtros passa banda estreita MDM (a) e ADI (b).

Esses filtros podem ser vistos como um etalon aonde no caso do filtro MDM os metais são os refletores e no filtro ADI o empilhamento $\lambda/4$ são os refletores do etalon. O espaçamento entre os refletores do etalon seria de $\lambda/2$ (camada de MgF_2).

Para maiores detalhes recomendamos as referências[11,14,9,15].

Para projetarmos e graficarmos tais filtros utilizamos os programas PFIL.FOR e FMED.FOR, como é visto nas figuras 28 e 29 suas curvas características.

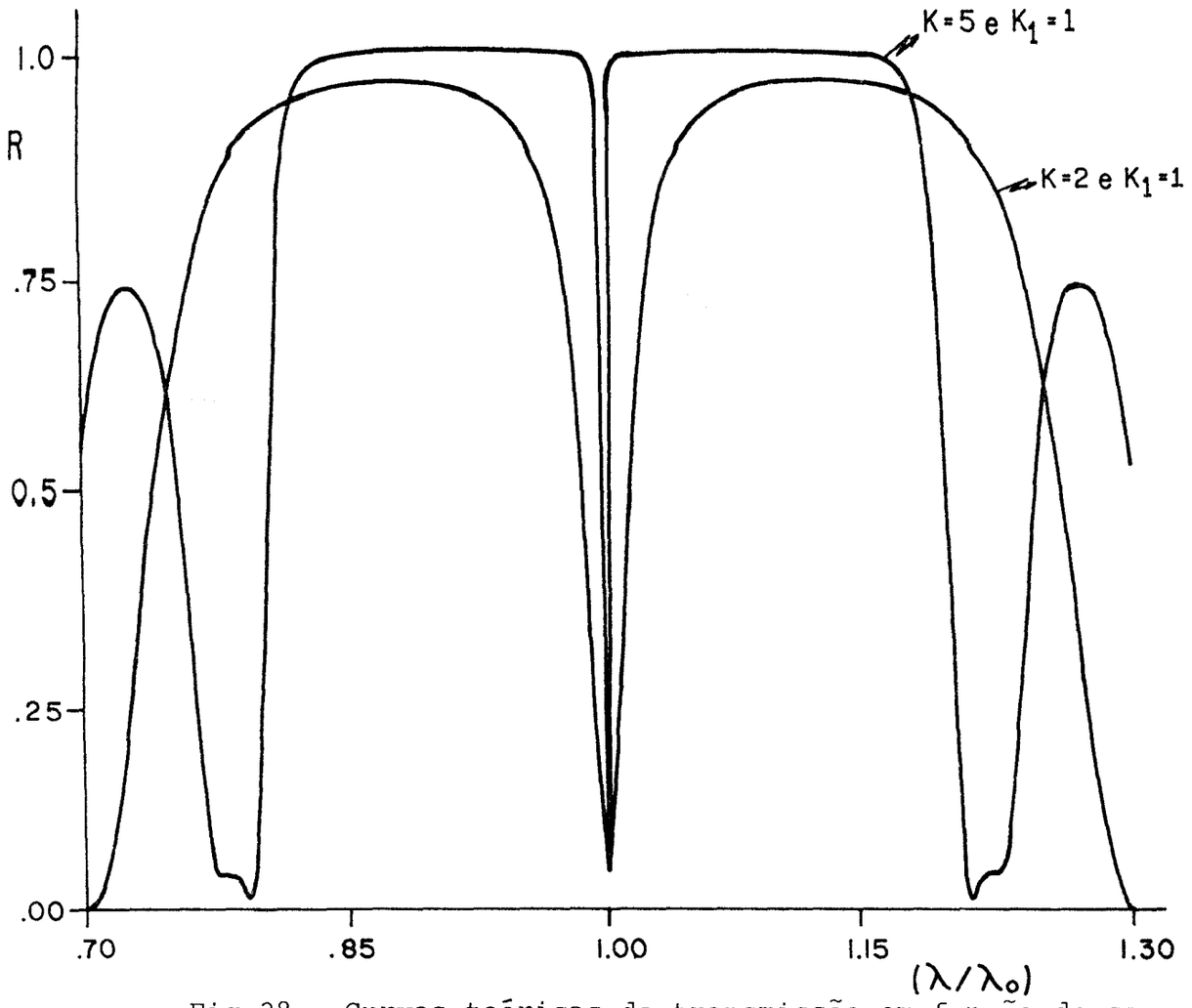


Fig.28 - Curvas teóricas da transmissão em função do comprimento de onda, para dois filtros interferenciais todo dielétrico (ADI) com $K=5, K_1=1$ $K=2, K_1=1$ e NH=2.30, NL=1.45. Essas curvas são obtidas a partir da sequência 9 do programa PFIL.FOR.

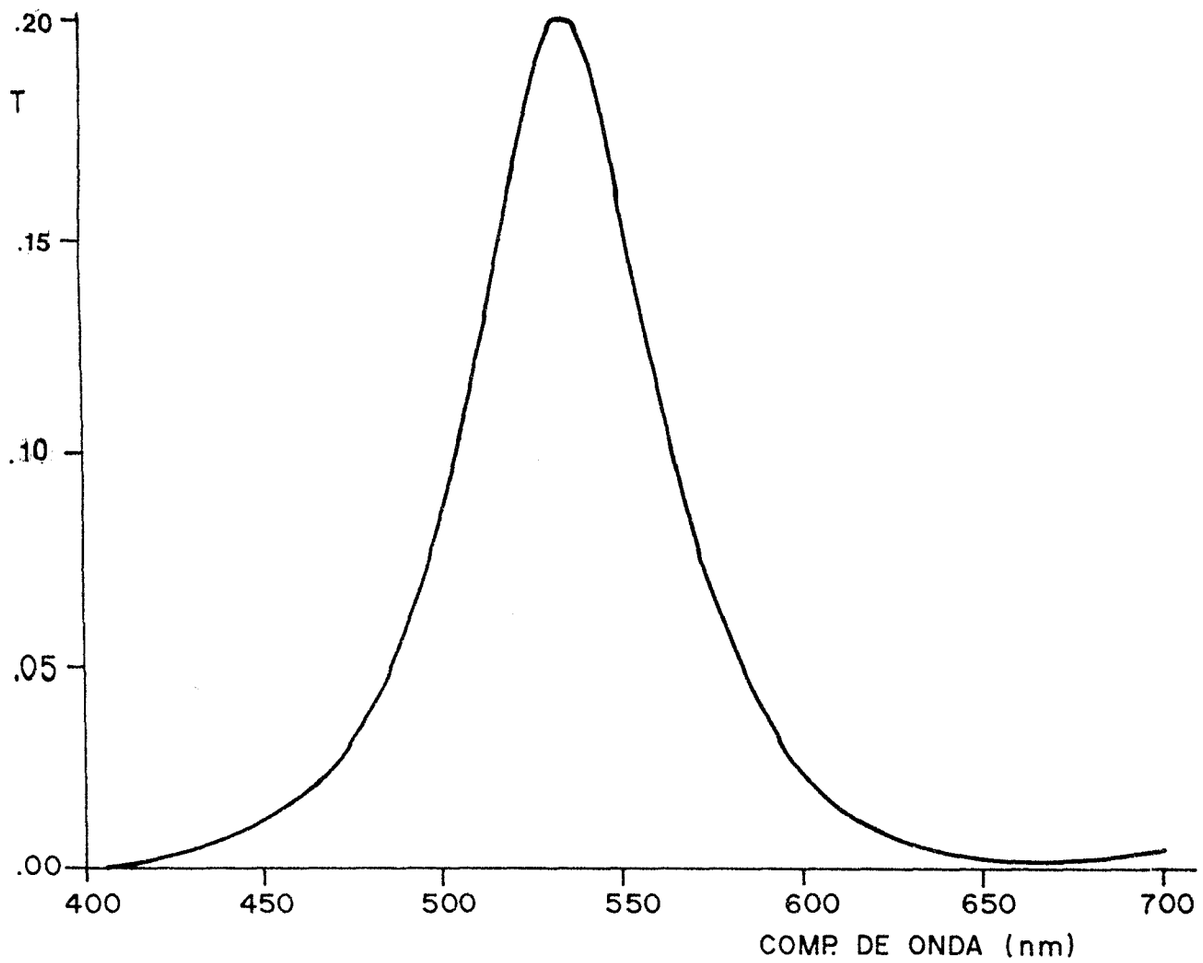


Fig.29 - Curva teórica da transmissão em função do com - primento de onda, para um filtro interferencial metal-dielétrico-metal (MDM) de Al-MgF_2-Al, obtido a partir do programa FMED.FOR.

Os empilhamentos utilizados para tais filtros são do tipo:

a) V/MDM/A (programa usado FMED)

B) $V/(HL)^K H (LH)^K/A$ onde H e L representam camadas $\lambda/4$ de índices de refração alto e baixo respectivamente (programa usado PFIL).

3.6. Separador de feixes

Separadores de feixe (beam splitters) são utilizados como o próprio nome diz, para dividir um feixe incidente em dois, um transmitido e o outro refletido. Os separadores de feixe são nor - malmente classificados em:

a) separadores de feixe acromático ou neutro

b) separadores de feixe seletivo de cor ou espelhos di - crôicos.

3.6.1. Separadores neutros:

Os separadores neutros tem a propriedade de separar o feixe em um espectro largo de frequência (por exemplo em todo o espectro visível), esses são normalmente utilizados em sistemas óticos interferométricos onde é importante que todas frequências se - jam separadas igualmente.

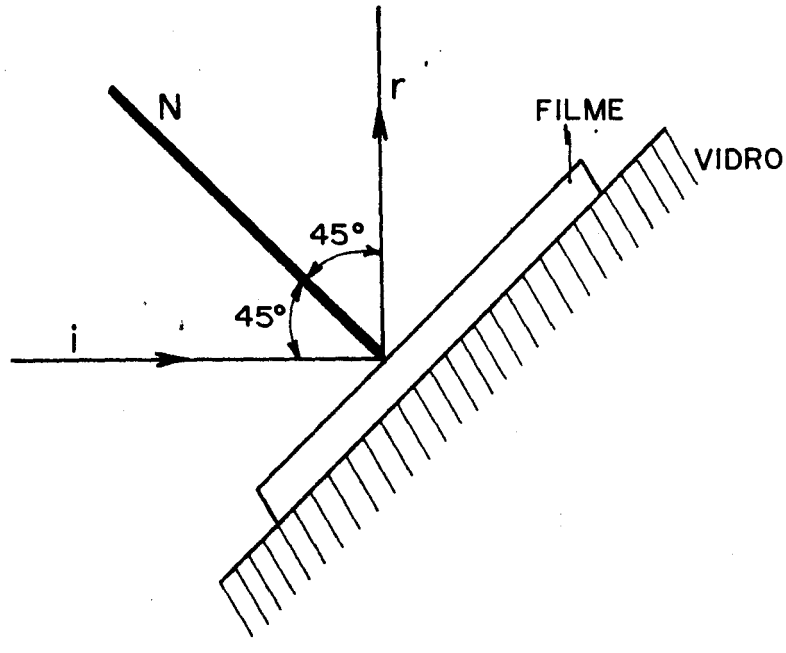


Fig.30 - Ilustração de um separador de feixe neutro.

Um separador neutro pode ser construído pela evaporação de uma camada metálica muito fina como esquematizado na figura 30. Para o alumínio a transmissão do coating está relacionada com a espessura da camada, como é mostrado na figura 31.

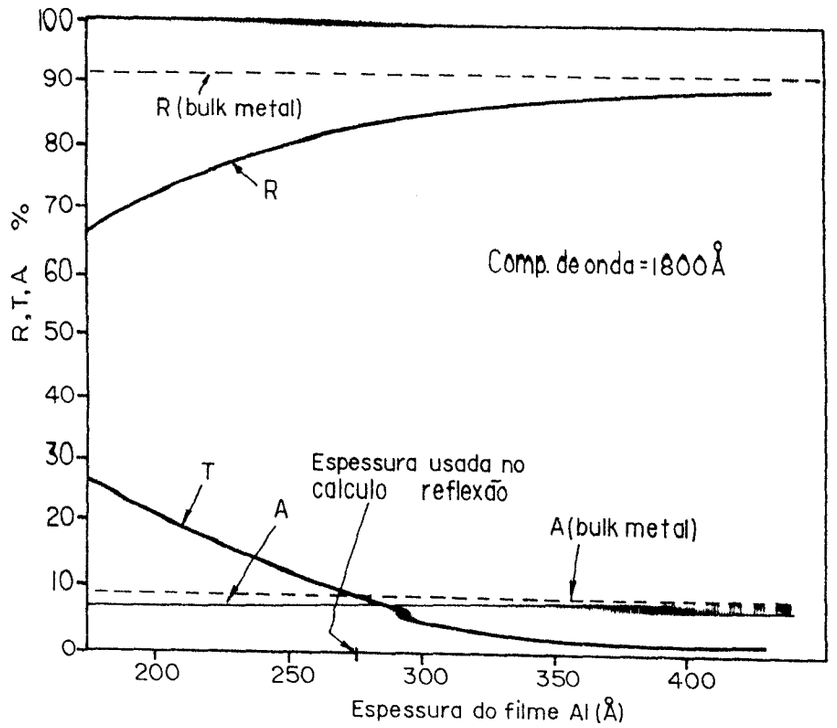


Fig.31 - Curva teórica da refletividade em função da espessura para o espelho de Al.

Para maiores detalhes recomendamos as referências[15,11,14].

3.6.2. Espelhos dicroicos:

Os separadores seletivos de cor separam o feixe incidente em uma banda estreita de frequência. Esses são utilizados quando deseja-se selecionar uma cor da luz incidente; Uma das aplicações mais importantes destes separadores são em cameras de TV colorida, como é mostrado na figura 32.

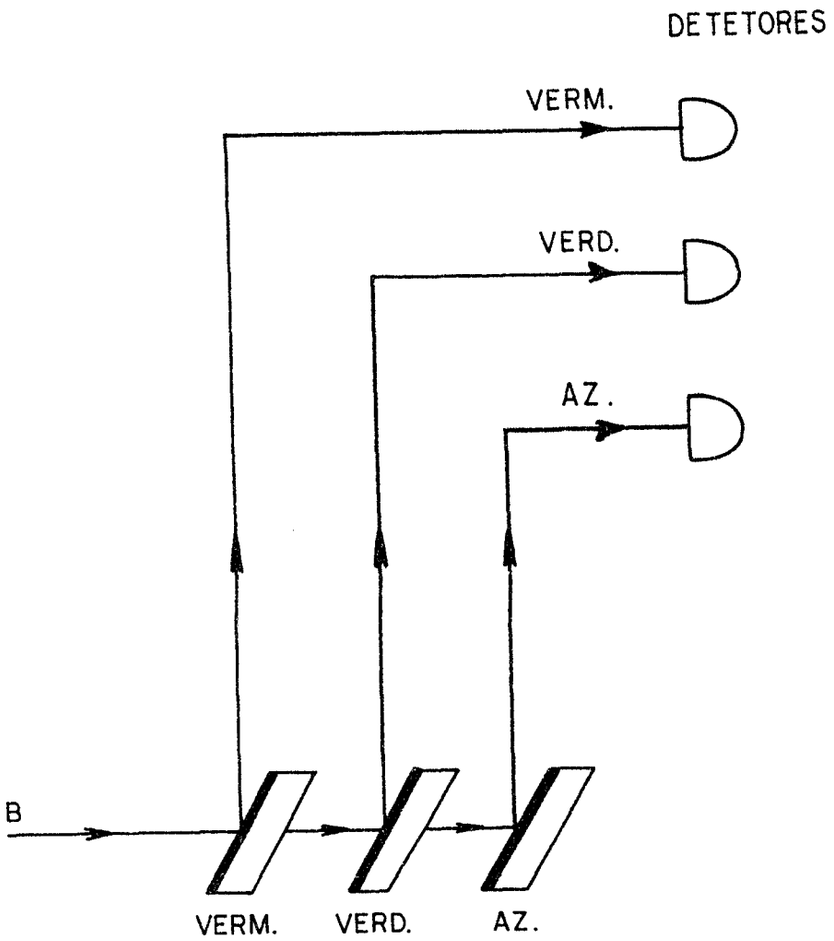


Fig.32 - Esquema de um sistema seletivo de côr.

Um separador de feixe seletivo pode ser produzido, por um empilhamento de múltiplas camadas alternadas do tipo:

$V/(0.5H)L(HL)^K(0.5H)/A$

Outros espelhos seletivos são também os já mostrados nas figuras 21 e 22, principalmente o de banda estreita figura 22 que é muito utilizado para selecionar uma faixa de frequência intermediária (por exemplo o espelho verde na camara de televisão colorida).

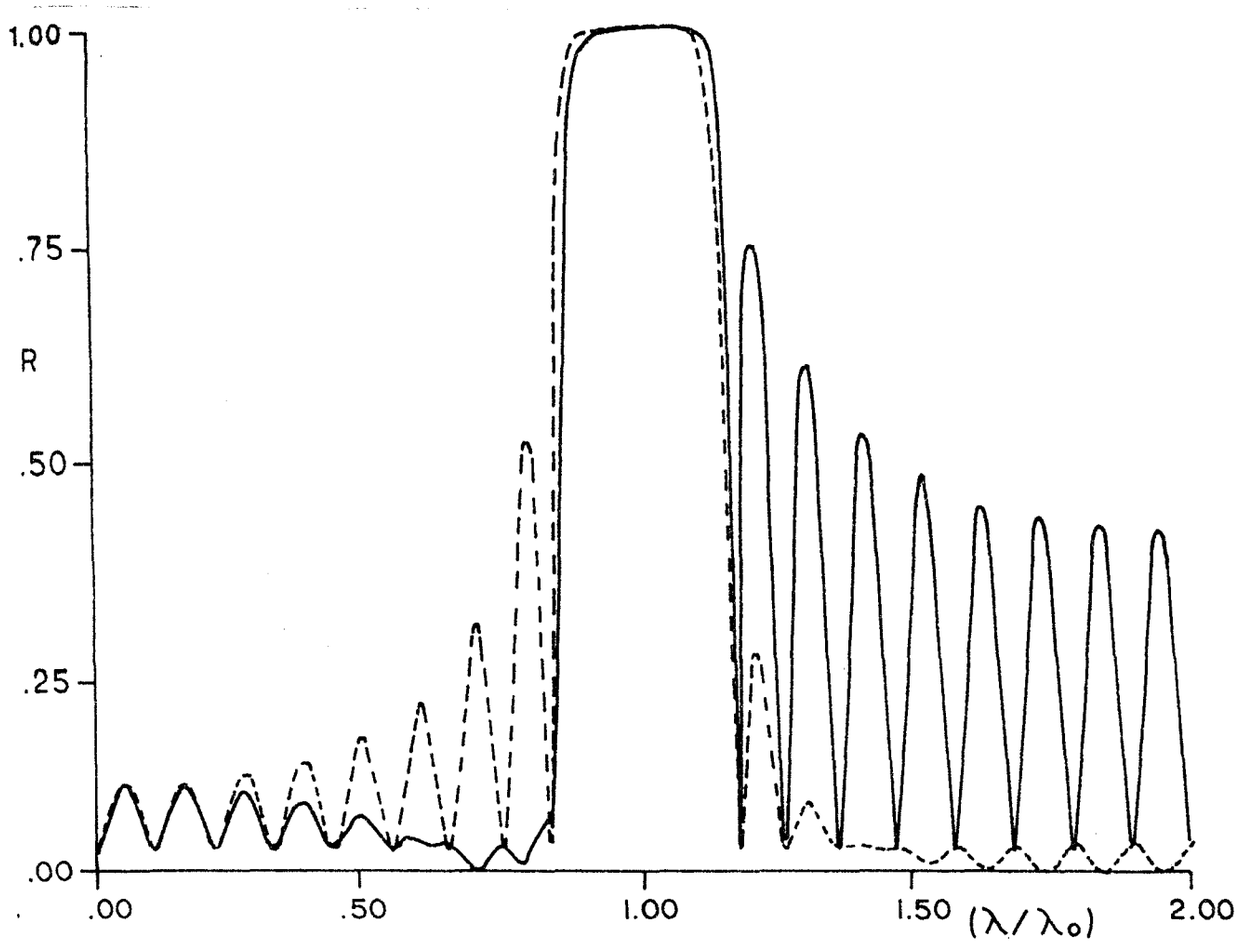


Fig.33 - Curva teórica da refletividade em função do comprimento de onda, para um separador de feixe seletivo de côr obtido através das sequências 4 e 5 do programa PFIL.FOR com K=10, NH=2.30 e NL = = 1.45.

CAPÍTULO IV

TECNOLOGIA UTILIZADA EM FILMES FINOS

4.1. Introdução

Neste capítulo tentaremos, descrever todo o equipamento, utilizado na produção tecnologica dos "coatings" de filmes finos especializados (capítulo III). Para isto, foi que resolvemos divi-di-lo da seguinte forma:

4.1. Introdução

4.2. Descrição da evaporadora

4.3. Descrição do sistema de limpeza

4.4. Obtenção dos fatores de potência da evaporadora

4.5. Descrição do sistema de medida

4.6. Calibração das espessuras produzidas por medida fotométrica

4.7. Conclusão,

onde cada uma dessas seções mostram, o que há de mais importante , para que bons "coatings" sejam produzidos. Começaremos por descrever o equipamento mais importante nessa experiência.

4.2. Descrição da evaporadora

Utilizamos para a produção dos COATINGS de filmes finos especializados, como aparelho principal, uma evaporadora BALZERS BAK 600 tipo "box coater", sendo a mesma dividida em duas seções , a camara de evaporação e os paineis de controle dos parâmetros de evaporação.

Os recursos que dispõem esta evaporadora são listados a seguir:

- Eletron-beam com cadinho para três ou quatro materiais.
- Duas barcas de evaporação.
- "Glow discharge" para limpeza do substrato.
- Medidor de espessura de quartzo com resolução de 1Å.
- Medidores de alto e baixo vácuo.
- Sistema para rodar substrato.
- Sistema para aquecer substrato.
- Válvula para controlar pressão de um gás reagente na camara.
- Micro-processador para controlar automaticamente todos os parâmetros de evaporação (espessura, rate, temperatura, pressão, etc). Este microcomputador pode controlar a evaporação de 24 camadas de até quatro materiais diferentes automaticamente.
- Micro-processador para controlar o sistema de vácuo .
- Controle automático de nitrogênio líquido.

A figura 34 mostra o sistema de controle dos parâmetros de evaporação.

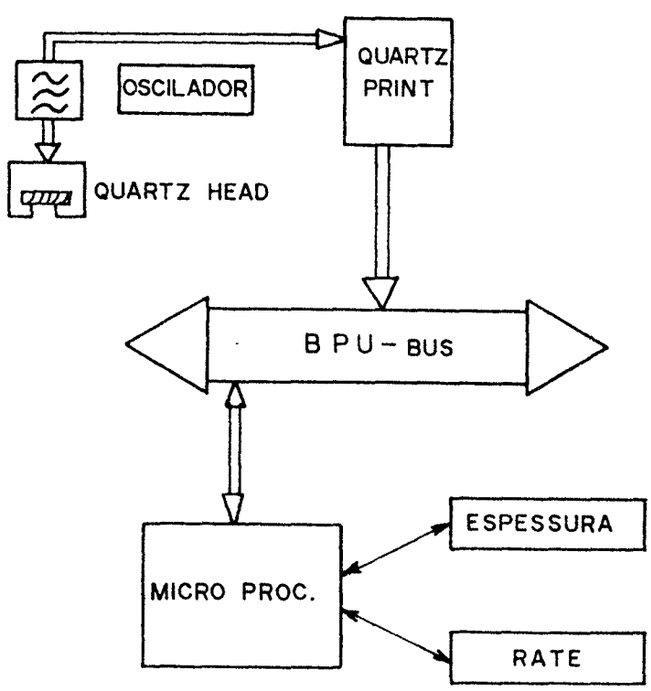


Fig.34 - Esquema do sistema de controle dos parâmetros de evaporação.

O microcomputador que controla os parâmetros de evaporação é baseado na cpu IM6100 e é equivalente a um PDP8.

A espessura é medida pela variação da frequência de um cristal de quartzo, quando se deposita o material que está sendo evaporado.

A seguinte equação é aplicada para mudança na frequência natural

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{-\Delta d}{d} = \frac{-\Delta m}{pf.f.d} \qquad (69)$$

paralelamente a espessura da camada depositada pode ser obtida por:

$$d_s = \frac{K}{e_d} \cdot \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{f_o} \right| \qquad (70)$$

onde d_s= espessura da camada, e_d= densidade específica do material depositado, f_o= fequência de partida, f= frequência atual, e K = = constante.

O sistema de vácuo da evaporadora consiste de uma bomba mecânica, uma bomba difusora de 12" e "baffles" refrigerados a nitrogênio líquido ou freon.

Na figura 35 mostramos o sistema de vácuo da evaporadora.

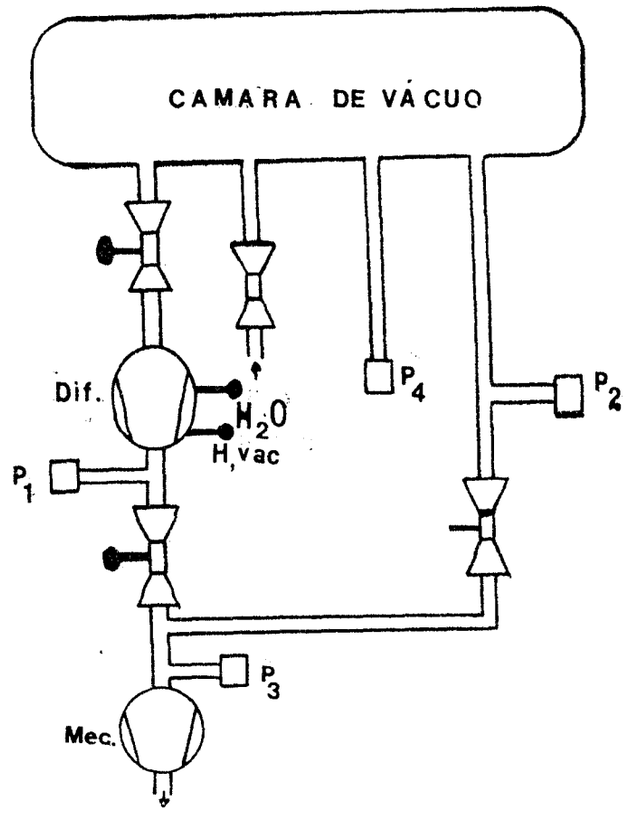


Fig.35 - Esquema do sistema de vácuo da evaporadora.

O sistema de vácuo é capaz de alcançar 10E-06 torr em alguns minutos, o que nos permite fazer uma boa e rápida evaporação.

A evaporadora pode ser utilizada para evaporar pratica - mente todos os tipos de metais e dielétricos. Entre as aplicações que esta pode ter podemos citar:

- Múltiplas camadas dielétricas para ótica. (Nosso caso de estudo)
- Espelhos metálicos. (Os demais estão em aberto)
- Máscaras para circuitos integrados.
- Camada de contacto em semicondutores e células solares.
- Superfícies seletivas.
- Filmes finos de materiais magnéticos.
- Filmes supercondutores.

4.3. Descrição do sistema de limpeza

A experiência nos mostra, que para obtermos, recobrimento "coating" de substrato com uniformidade e aderência, temos que utilizar um processo rigoroso de limpeza desse substrato. Para isto, foi desenvolvido um sistema de limpeza de substratos, o qual passaremos a descrevê-lo.

O processo de limpeza de substrato, por nós utilizado no laboratório de filmes finos é constituído de duas etapas de limpeza:

A primeira etapa, temos dentro de um aparelho de ultra - som ligado, damos um banho no substrato na água com detergente (detergente neutro TEEPOL da SHELL), um banho no substrato na água destilada, e por último um banho no substrato no álcool. Isto permite uma primeira limpeza dos substratos a serem evaporados.

A segunda etapa, temos um sistema de condesação de vapor de álcool no substrato que sofreu a passagem pela primeira etapa descrita acima. Esse método de limpeza se baseia na evaporação de álcool (iso-propílico) que se condesa sobre os substratos e retorna ao banho retirando assim todas as sujeiras existentes nas superfícies dos mesmos, como é mostrado na figura 36. Um fator importante neste método é que o vapor não contém nenhuma impureza sólida.

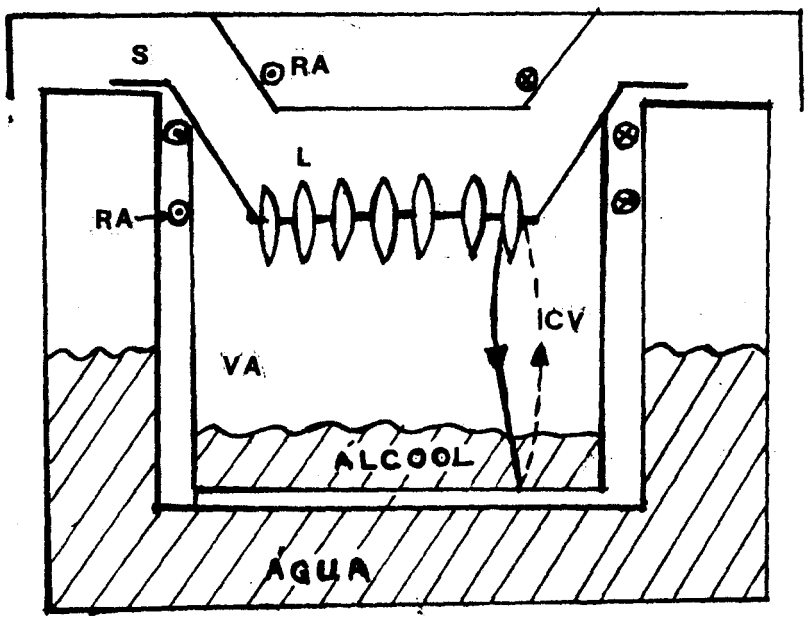


Fig. 36 - Esquema do sistema de limpeza de substrato (banho térmico).

S = suporte de substratos, L=lentes (substratos), RA = = rede de circulação de água (⊙= entrada, ⊗ =saída), VA = vapor de álcool e CV= circulação do vapor de álcool.

Feita a limpeza o substrato está pronto para ser colocado dentro da campânula da evaporadora, e sofrerá uma "glow dis - charge" que, pelo processe de descarga iônica, executa uma limpeza final, principalmente eliminando poeira por repulsão eletrostática.

Um banho de ácido ou base, antes do procedimento descrito, é recomendado quando o substrato tinha um coating inicialmente (recuperação do componente ótico) ou quando a sujeira não foi retirada com o detergente.

4.4. Obtenção dos fatores de potência da evaporadora

Para iniciarmos a evaporação de um material pela primeira vez é necessário a obtenção dos fatores de potência da evaporadora. Para obtermos esses fatores existem uma série de passagens, como por exemplo, registrador das potências verso tempo, programação do microcomputador (VP,TN,TV,T1,T2,T3,T4,P1,P2,P3,P4), que são fatores importantes no ajuste para sua obtenção. Na figura 37 mostramos um gráfico da potência verso tempo, para um filme com sete camadas de Ti_2O_3-SiO_2, onde nele vemos os valores obtidos das potências de evaporação.

A Tabela abaixo mostra os fatores de potências dos materiais Ti_2O_3 e SiO_2, realizados no laboratório de filmes finos.

TABELA I

Tabela de fatores de potências

Laboratório de Filmes Finos

Parâmetros	Materiais	
	Ti_2O_3	SiO_2
TH	1101Hz	915Hz
R	10Hz/s	20Hz/s
M	1.9	1.9
T1	900s	---
T2	350s	---
VP	0.7	0.3
TN	5.0	2.5
TV	0.5	0.2
T3	100	80
T4	80	80
P1	44	25
P2	51	30
P3	59	35
P4	--	--
N	--	--
E-beam	sim	sim
KV	6	6
Amp.long.	0.3	0.3
Amp.lat.	6.5	6.5
Cadinho	próprio	próprio
PO_2	3×10E-4	3×10E-4
Ts	250°C	250°C
Fator	0.833	0.833

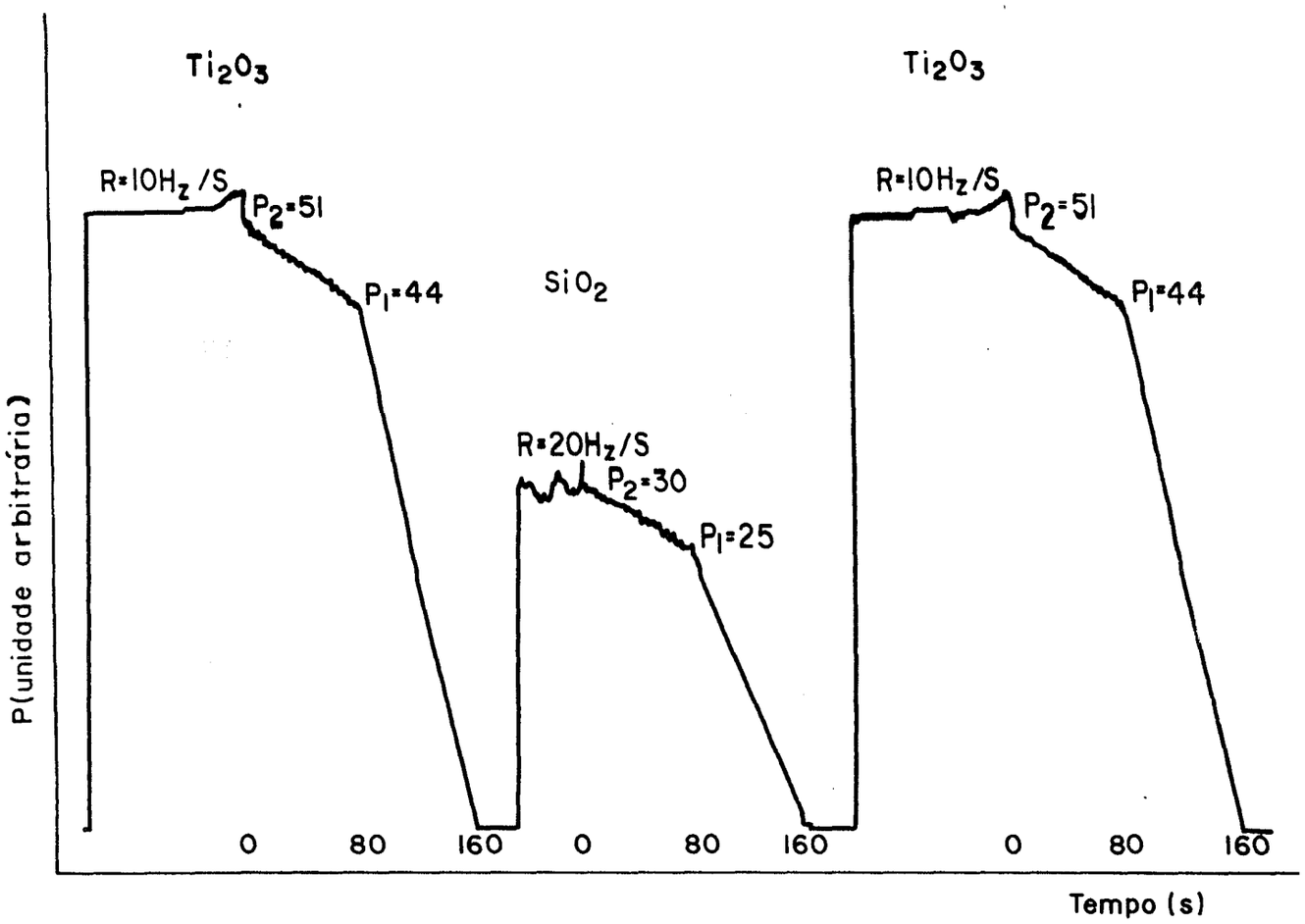


Fig.37 - Curva experimental potência verso tempo para um filme de sete camadas de Ti_2O_3-SiO_2

Esse gráfico é medido no registrador PHILIPS que está acoplado ao microcomputador, para o ajuste das potências e tempos necessários para encontrarmos a razão de evaporação, ou seja, a taxa de variação de frequência, para cada tipo de material que se quer evaporar. Uma vez feito esse registro, anotamos os parâmetros ótimos encontrados e finalmente esse material está pronto, para a realização dos testes iniciais da calibração das espessuras.

5.5. Descrição do sistema de medida

Para confrontação dos resultados teóricos com resultados experimentais e caracterização dos coatings produzidos, construi -

mos um acessório para medir a refletividade que se adapta no es - pectrometro CARY 17 do DFCM, permitindo obtermos o espectro de reflectância do coating. O acessório é constituído por uma caixa que se adapta nos feixes de medida e de referência do espectrometro e é mostrado na figura 38.

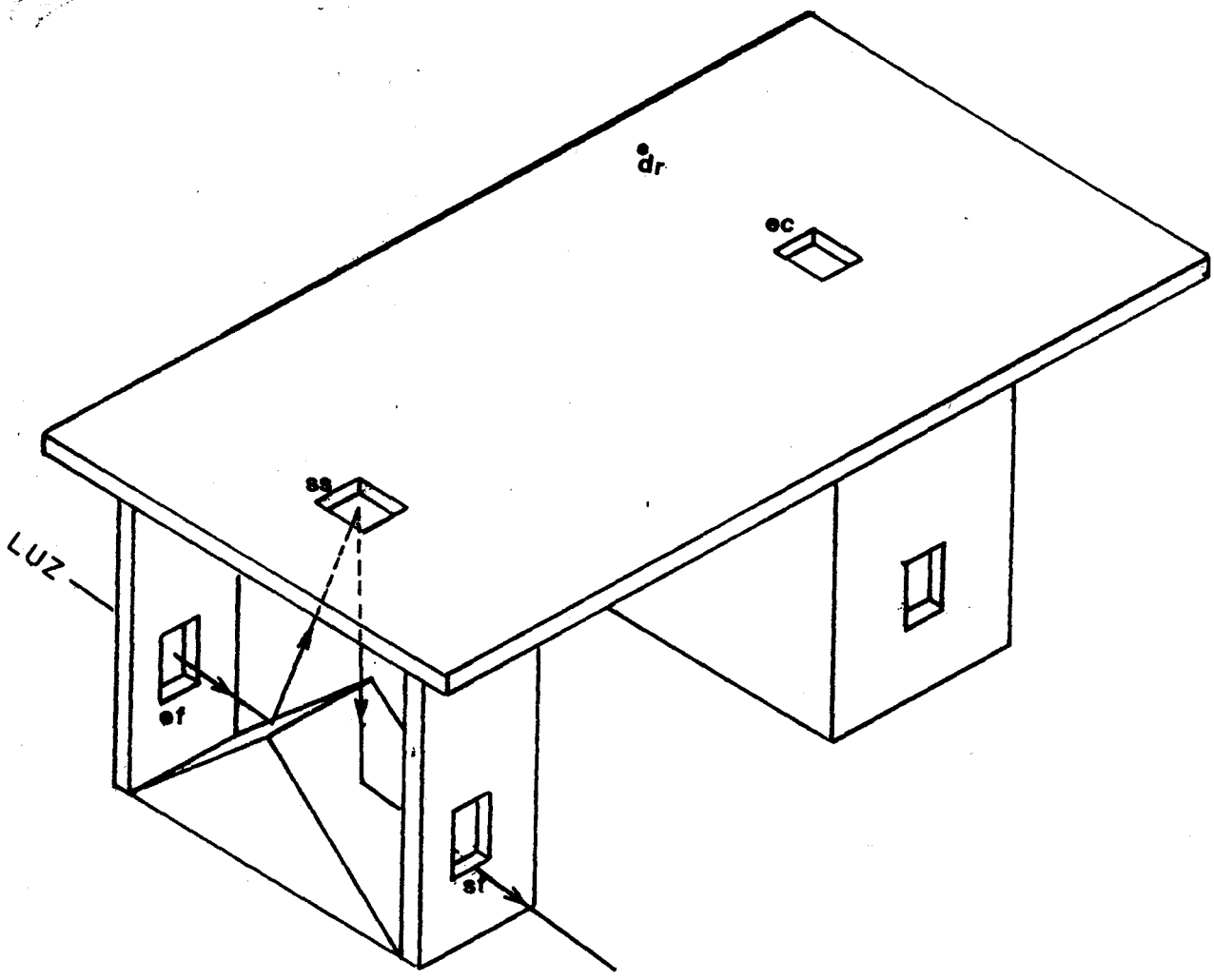


Fig.38 - Esquema do acessório de medida da refletividade

Nesse esquema temos que ss=suporte para colocar o filme, dr= diafragma para calibração da refletividade, ec= espelho da calibração, ef= entrada do feixe de luz e sf = saída do feixe de luz. O trajeto indica o caminho seguido pelo feixe de luz, que é utilizado para medir o valor da reflectância comparado ao feixe de referência. O ângulo de reflexão do feixe sobre o coating a ser medido é em torno de 7,5^{o}. Este sistema permite-nos uma medida com precisão menos .1% na reflectância.

4.6. Calibração das espessuras produzidas por medida fotométrica

As espessuras óticas programadas na evaporadora, sofrem um desvio de seu valor quando evaporados, devido a fatores geométricos da própria camara de vácuo. Nas linhas que seguem descrevemos rapidamente o método que utilizamos para testar as espessuras das camadas evaporadas e com isso fazer um fator de correção entre o valor da espessura programado e a espessura obtida.

O teste consiste em se fazer em primeiro lugar, um coating de uma camada, do material que se quer evaporar. A figura 39, a qual mostra as curvas teóricas da refletividade em função do comprimento de onda para o coating com uma camada. Após evaporar o coating fazemos a medida do espectro de refletividade, comparamos ao teórico e encontramos um fator de correção na espessura programada de tal forma que a posição dos máximos e mínimos da refletividade do coating coincida com o valor teórico.

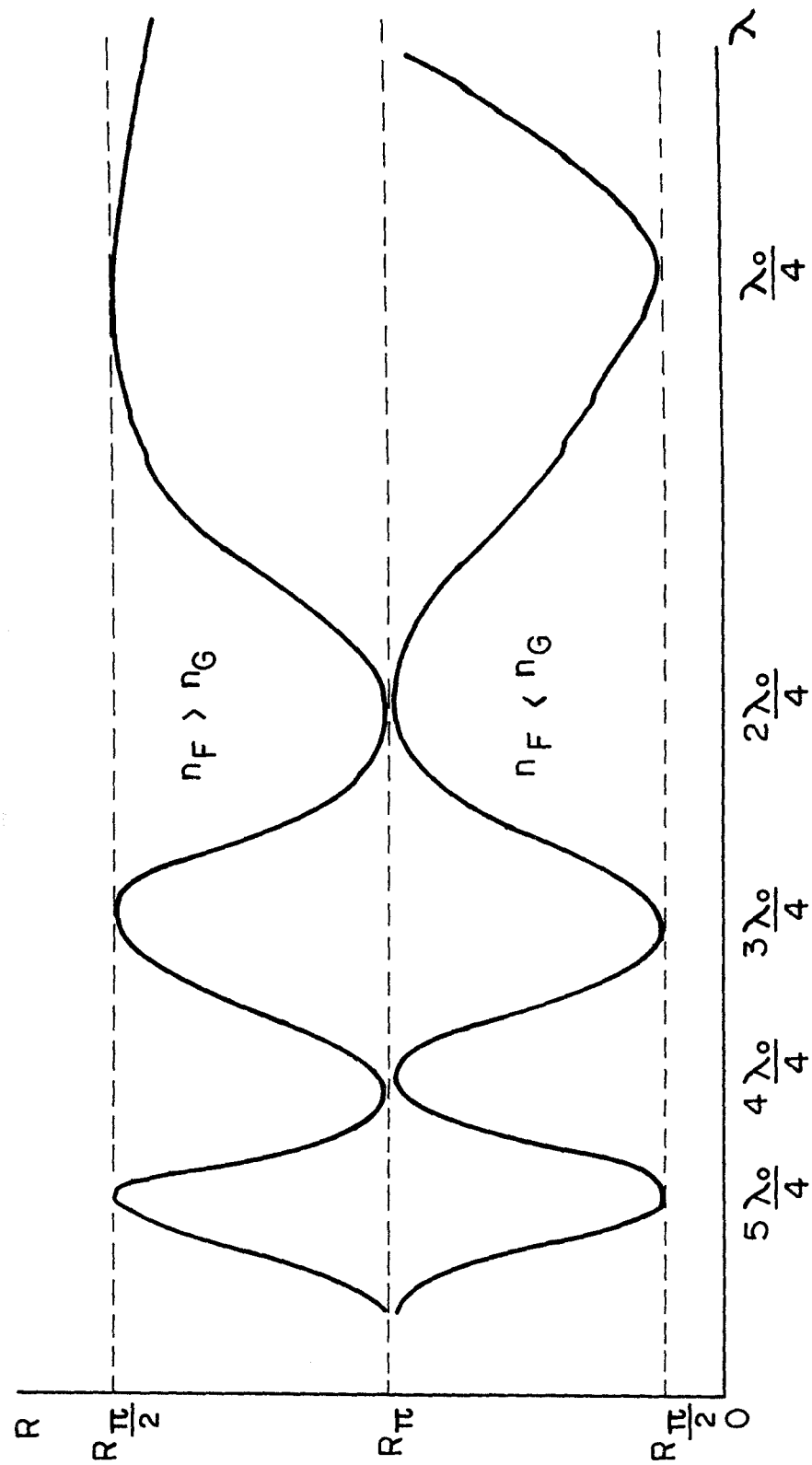


Fig. 39 - Curva teórica da refletividade do coating de uma camada utilizada na calibração das espessuras, (nG=índice do vidro, nF= índice do filme).

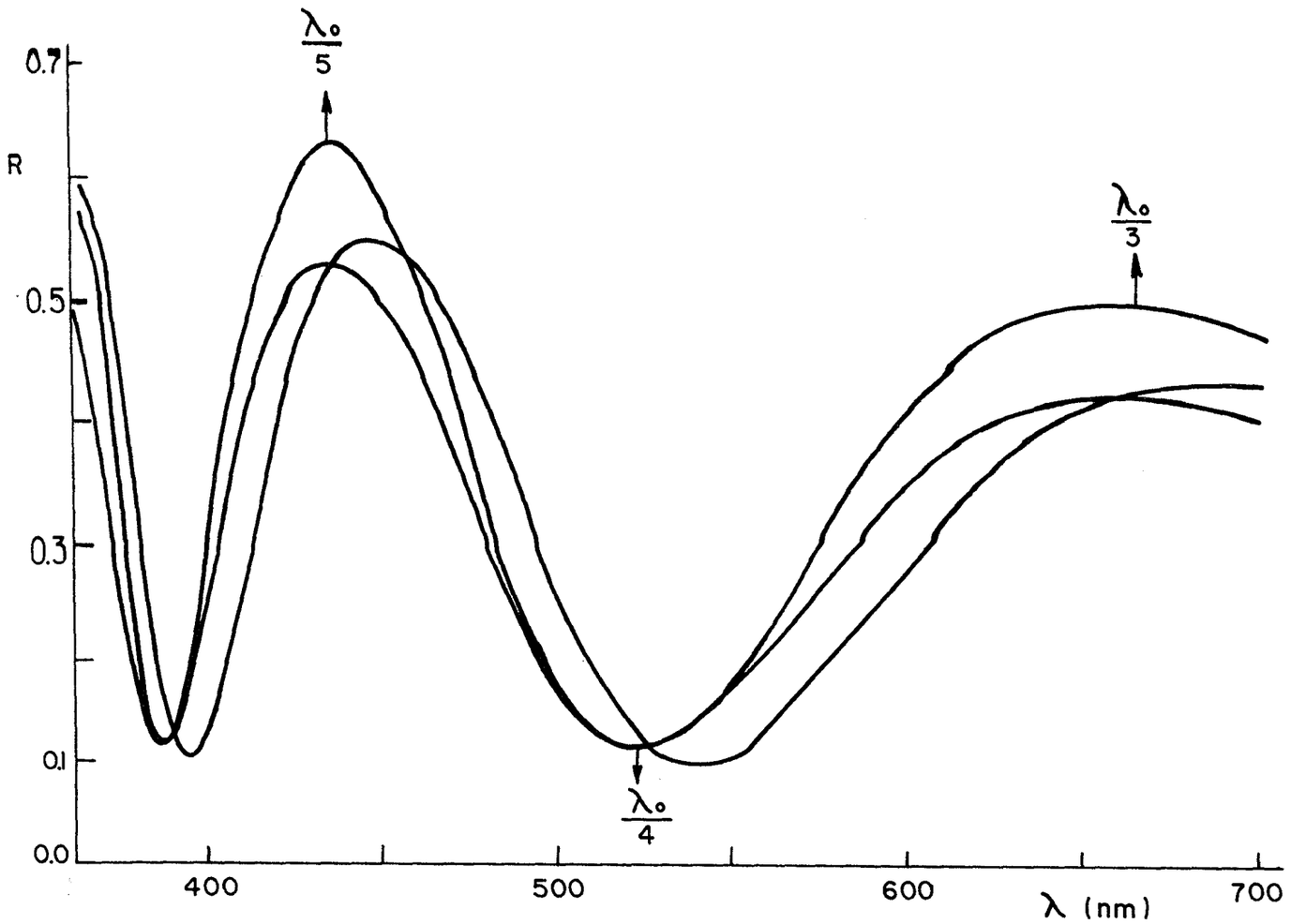


Fig.40 - Curva experimental do teste de Ti_2O_3 para calcular o fator de correção.

O fator de correção é dado por f=λcal/λexp, onde λcalc são os comprimentos de onda dos máximos ou mínimos da curva teórica para os parâmetros programados na evaporadora e λexp são os valores obtidos no espectro de refletividade. Esse fator é extremamente dependente do material evaporado e das condições de evaporação; pressão parcial de O_2, temperatura do substrato, razão de evaporação.

Para a produção de coatings a espessura utilizada na evaporadora deverá ser o valor teórico multiplicado pelo fator de correção: $TH_{evap} = f.TH_{calc}$.

A figura 40 mostra o espectro de refletividade de um filme de Ti_2O_3 de 3λ/4 para λ_o=550nm, o máximo da refletividade em

$3\lambda/4$ que deveria estar em $\lambda calc=550nm$ se encontra em $\lambda exp=660nm$ resultando um fator de correção $f=0.83333$.

4.7. Conclusão

Após a conclusão da limpeza de substratos, obtenção dos fatores de potência, calibração da espessura para os materiais utilizados no multi-coating, a evaporadora é finalmente programada para a produção das camadas. Finalmente o espectro é obtido no espectrometro. No próximo capítulo discutiremos as características de alguns coatings produzidos.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

Neste capítulo apresentamos os resultados experimentais, mostrando os espectros da reflectância e/ou transmitância de cada um dos tipos de "coatings" descritos no capítulo III, os quais foram produzidos no laboratório de filmes finos. Finalmente analizaremos os pontos concordantes e discordantes, tendo em vista a teoria apresentada.

Neste trabalho de dissertação damos ênfase aos "coatings" com materiais óxidos, pois alguns desses foram pela primeira vez evaporados no Brasil. Fizemos também "coatings" com materiais não óxidos.

Apresentaremos os resultados experimentais seguindo o modelo abaixo.

Tabela contendo os parâmetros: materiais utilizados (MU), comprimento de onda (CO), espessura da camada (ESP), índice de refração (IR), temperatura do substrato (TS) e pressão de oxigênio (PO_2), gráficos das curvas experimentais dos filmes produzidos, e por último fazemos uma análise dos resultados para cada um dos tipos de coatings feitos.

Seguindo este modelo passaremos agora a descrever os resultados obtidos na ordem que se segue.

5.2. Coating Anti-Refletor

Os coatings anti-refletores por nós produzidos foram os

seguintes: coating anti-refletor com uma camada, coating anti-refletor com duas camadas e coating anti-refletor com três camadas, os quais apresentaremos os seus respectivos resultados.

5.2.1. Coating anti-refletor com uma camada

A tabela 2 mostra as características físicas do coating anti-refletor com uma camada por nós produzido no laboratório.

TABELA 2 - Dados para coating anti-refletor com uma camada.

MU	CO	ESP	IR	TS	PO_2
Na_3AlF_6	450nm	$\lambda/4$	1.35	30^oC	--

A figura 41 mostra a curva experimental para coating anti-refletor com uma camada, com as características da tabela 2.

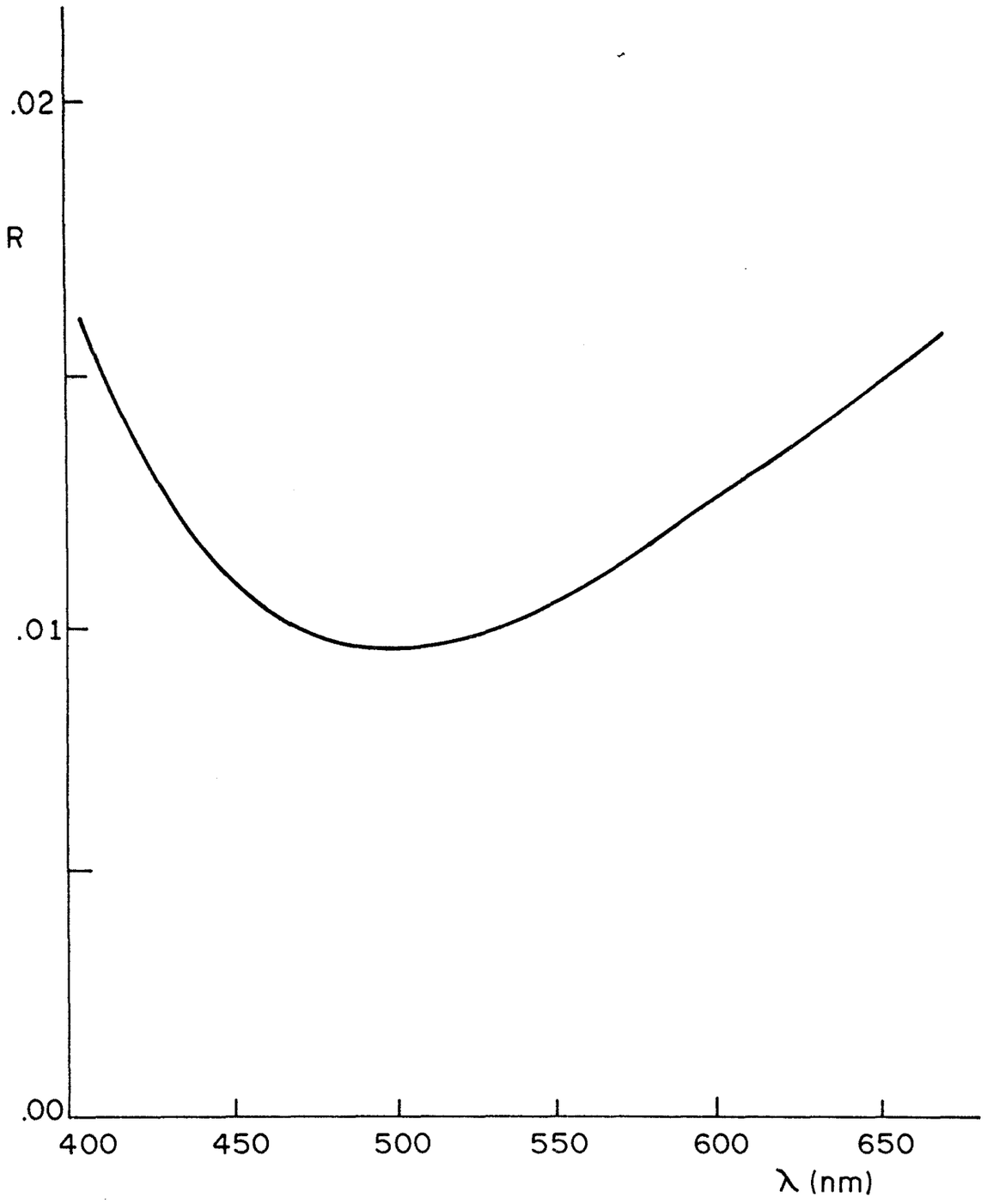


Fig.41 - Curva experimental do coating anti-refletor com uma camada de criolita.

Nesse coating obtemos uma refletividade menor que 1% , na região desejada (500nm), o que confirma os dados teóricos apresentados no capítulo III na figura 12. O deslocamento do ponto mínimo da refletividade de 450nm para 500nm, se deve ao fato de não termos utilizado o fator de correção que calibra a espessura da camada a ser evaporada. Com esse material como vimos obtemos ótimos resultados para coating anti-refletor de uma camada, mas a utilização de MgF_2 é também viável para que bons coatings anti-refletores sejam feitos. Se o coating é feito com MgF_2 o substrato deve ser aquecido a 250^oC.

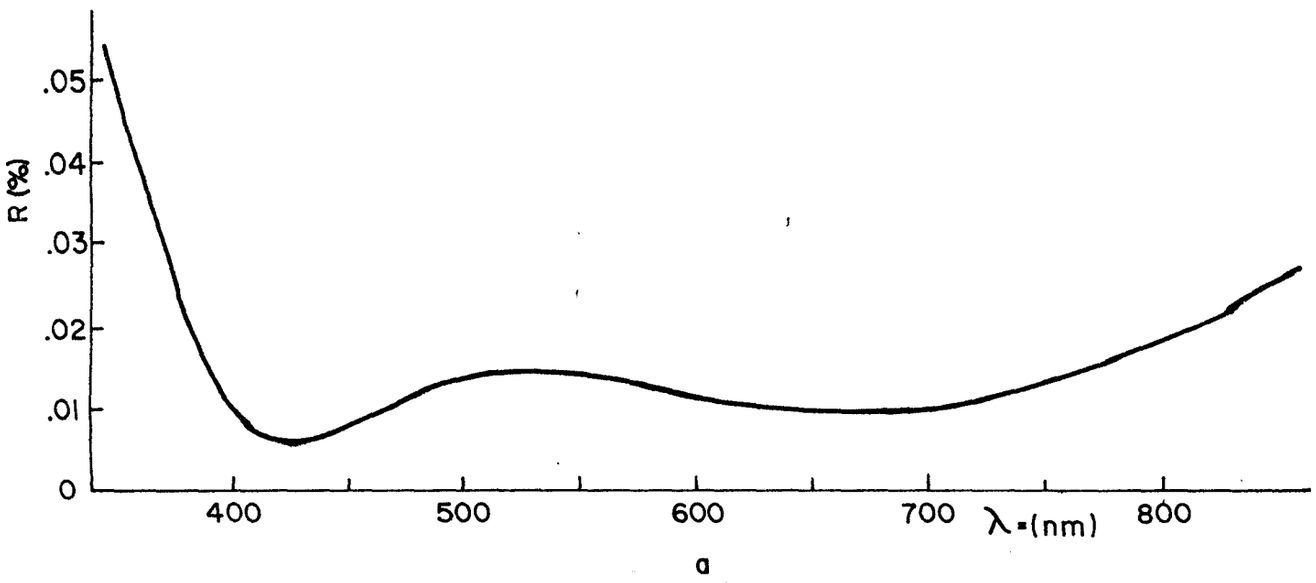
5.2.2. Coating anti-refletor com duas camadas

A tabela 3 mostra as características físicas do coating anti-refletor com duas camadas por nós produzido no laboratório.

TABELA 3 - Dados para coating anti-refletor com duas camadas.

MU	CO	ESP	ESP1	IR	TS	PO_2
MgF_2	550nm	$\lambda/4$	$\lambda/4$	1.38	250^oC	---
Al_2O_3	550nm	$\lambda/2$	$\lambda/4$	1.70	250^oC	3×10E-4torr

A figura 42 mostra as curvas experimentais para o coating anti-refletor com duas camadas, com as características da tabela 3.



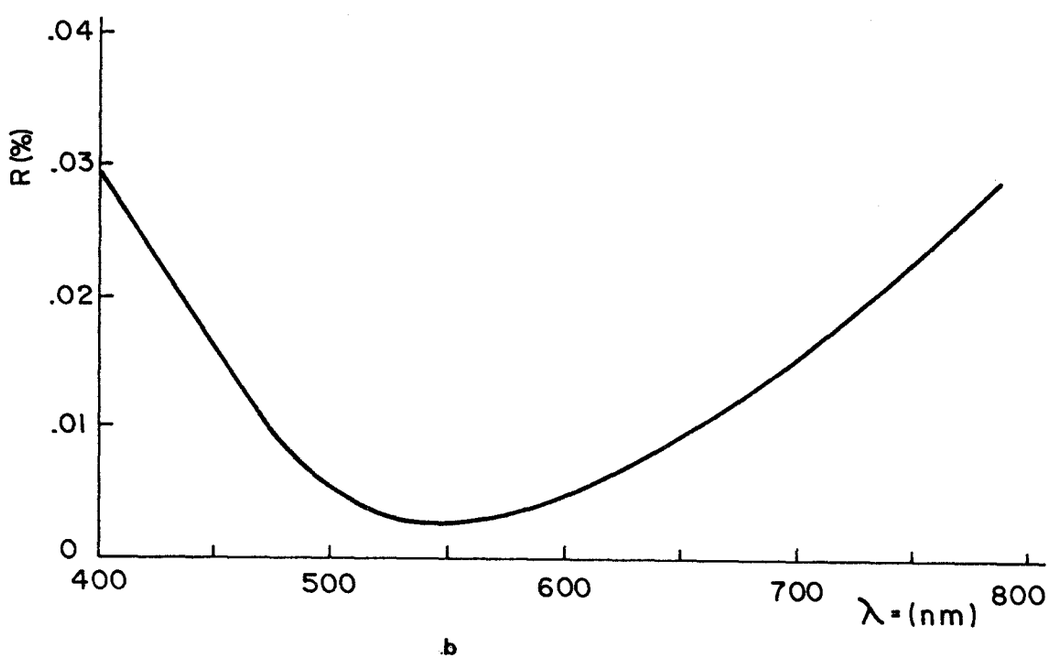


Fig.42 - Curvas experimentais do coating anti-refletor com duas camadas. (a) $\lambda/4-\lambda/2$ e (b) $\lambda/4-\lambda/4$.

Esse tipo de coating anti-refletor mostrado acima, concordam plenamente com as figuras 14 e 13 as quais apresentam uma reflectância mínima inferior a 1% na região inteira do visível. Esse fato se deve ao bom funcionamento e domínio da técnica adquirida para a evaporação desses materiais.

5.2.3. Coating anti-refletor com três camadas

A tabela 4 mostra as características físicas do tipo de coating anti-refletor com três camadas por nós produzido no laboratório.

TABELA 4 - Dados para o coating anti-refletor com três camadas

MU	CO	ESP	IR	TS	PO_2
MgF_2	550nm	$\lambda/4$	1.38	250^oC	3×10E-4torr
Al_2O_3	550nm	$\lambda/2$	1.70	250^oC	3×10E-4torr
Ti_2O_3	550nm	$\lambda/4$	2.30	250^oC	3×10E-4torr

A figura 43 mostra a curva experimental para o coating anti-refletor com três camadas, com as características da tabela 4.

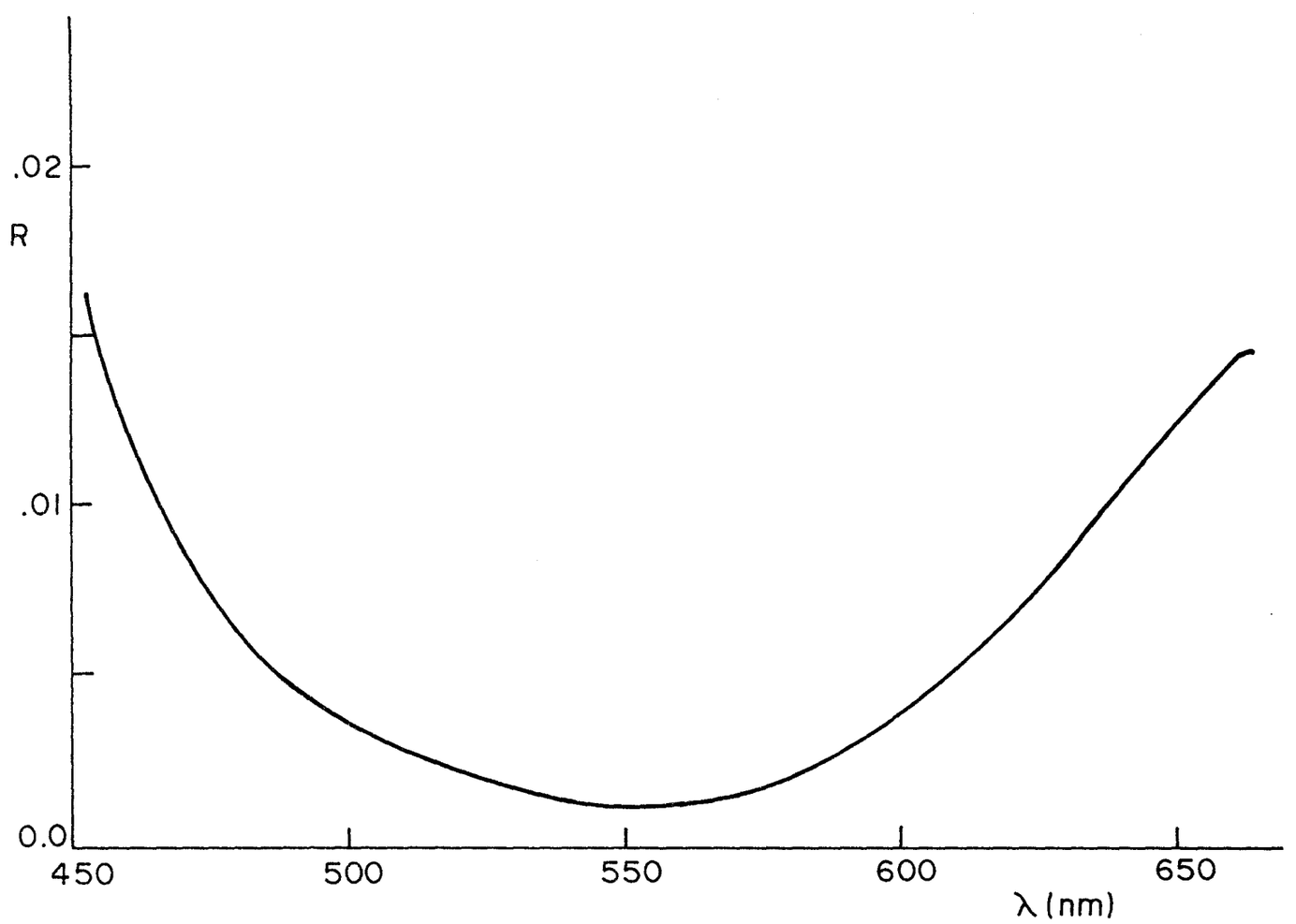


Fig.43 - Curva experimental do coating anti-refletor com três camadas, de espessura λ/4-λ/2-λ/4.

O espectro de reflectância medido pela curva acima é e - quivalente a curva mostrada no capítulo III, figura 17, o que confirma uma boa concordância de nossos estudos teóricos com a técnica experimental adquirida. O ponto de mínimo é constante e praticamente inferior a 0,1% na região inteira do visível, como era esperado tendo em vista que a interferência neste tipo de coating é destrutiva, portanto a luz é quase totalmente transmitida.

5.3. Espelhos dielétricos de alta refletividade

Os espelhos dielétricos de alta refletividade por nós produzidos no laboratório de filmes finos foram:

a) Espelhos para lasers de alta potência

b) Espelhos duros e de banda larga ("hard coating")

Passaremos agora a apresentar os seus respectivos resultados.

5.3.1. Espelhos para lasers de alta potência

A tabela 5 mostra as características físicas destes espelhos, por nós produzidos no laboratório.

TABELA 5 - Dados do espelho para lasers de alta potência

MU	CO	ESP	IR	TS	PO_2
MgF_2	550nm	$\lambda/4$	1.38	250^oC	---
MgO	550nm	$\lambda/4$	1.70	250^oC	---

A figura 44 mostra a curva experimental para o espelho

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP

com as características da tabela 5. Neste espelho os materiais escolhidos tem alto limiar de dano, isto é, suportam alta intensidade de luz antes que se danifiquem.

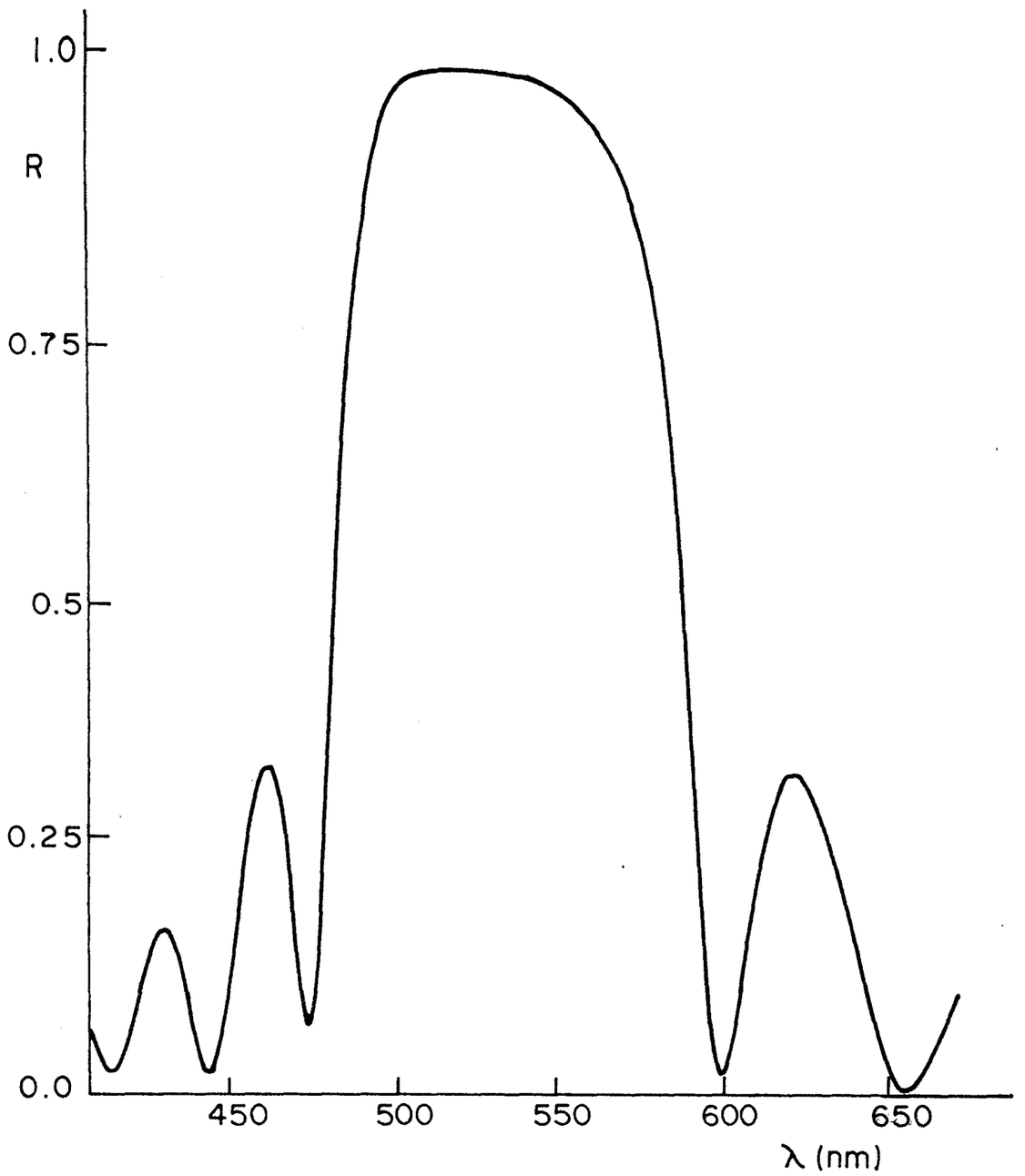


Fig.44 - Curva experimental do espelho para lasers de alta potência.

O coating tem refletividade maior que 99%, o que nos dá uma ótima confirmação com o apresentado teoricamente na figura 23. Uma pequena discordância é vista nos máximos subsidiários, devidos a alguns parâmetros da medida de calibração das espessuras das camadas. O limiar de dano do coating foi testado com o 2º harmonico de um laser Nd:YAG. O espelho se danifica a uma intensidade de 10 G Watts/cm^2 o que mostra seu alto limiar de dano.

5.3.2. Espelhos duros e de banda larga ("hard coating")

A tabela 6 mostra as características físicas dos espelhos duros e de banda larga ("hard coating"), por nós produzidos no laboratório.

TABELA 6 - Dados para espelhos duros e de banda larga ("hard coating")

MU	CO	ESP	IR	TS	PO_2
Ti_2O_3	550nm	$\lambda/4$	2.30	250^oC	3 10E-4torr
SiO_2	550nm	$\lambda/4$	1.45	250^oC	3 10E-4torr

As figuras 45 e 46 mostram as curvas experimentais para estes tipos de espelhos com ângulos de incidência de 45° e 0°, respectivamente, tendo as mesmas características da tabela 6.

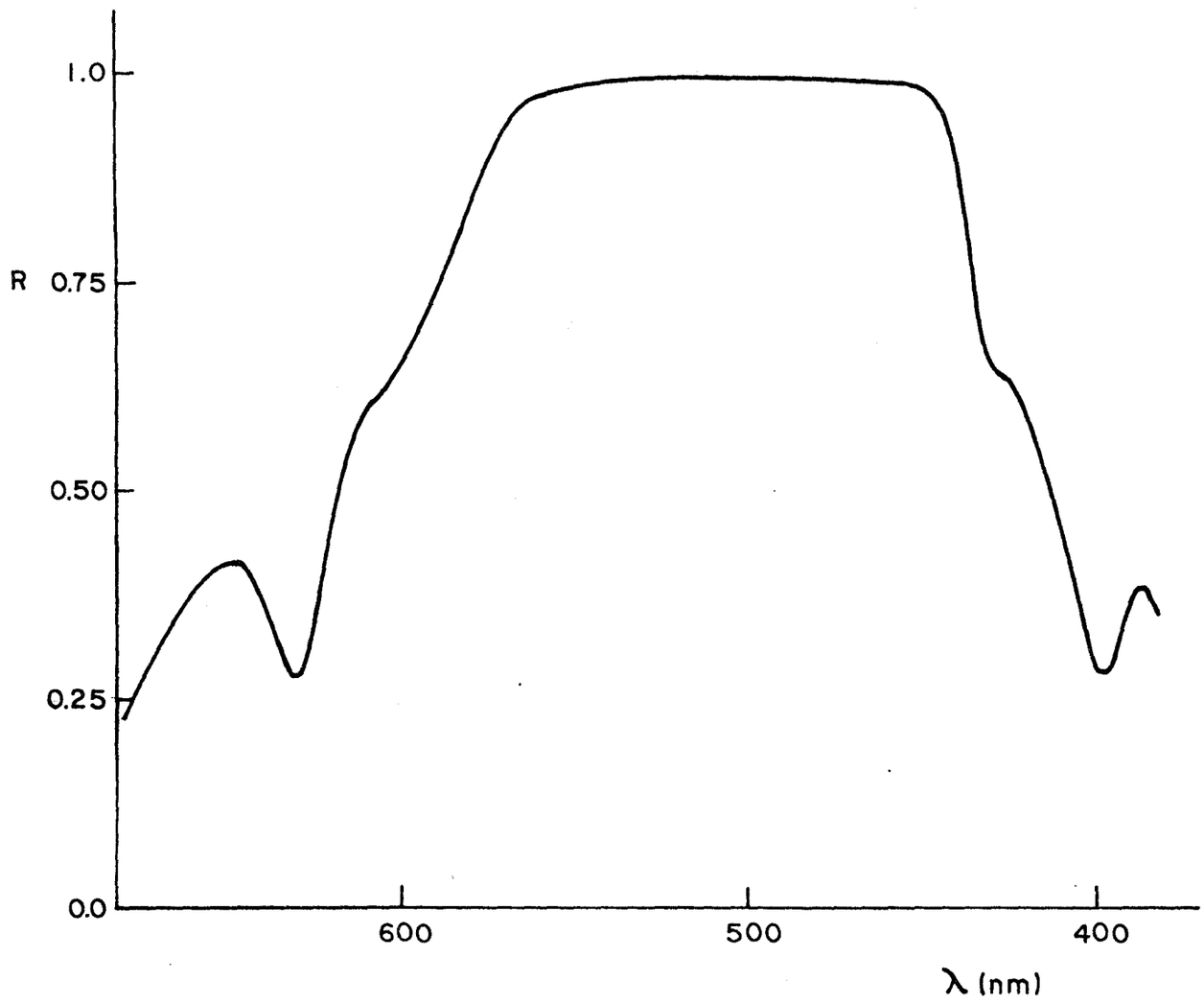


Fig. 45- Curva experimental do espelho duro e de banda larga, para ângulo de incidência 45°.

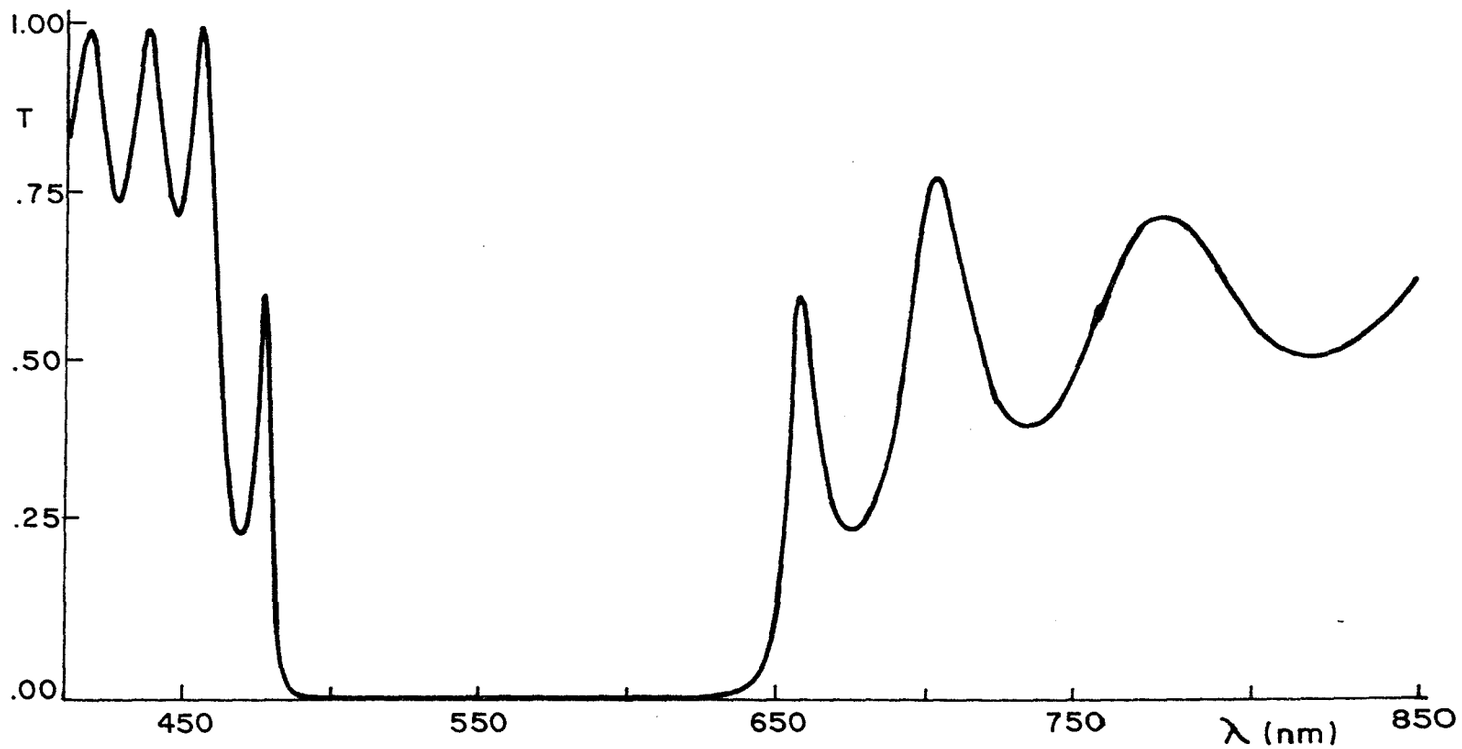


Fig.46 - Curva experimental do espelho duro e de banda larga, para ângulo de incidência 0° .

Esses espelhos de alta refletividade nos mostram uma boa concordância com os resultados teóricos da figura 22, onde vemos que a refletividade é muito maior do que 99,99% na região inteira do visível. A única discordância encontrada é sua forma assimétrica, para incidência 45° a qual atribuimos a falta de ajustes em alguns parâmetros desconhecidos no momento da realização dessa evaporação. Para incidência normal a curva é bem simetrica como era esperada. Esses espelhos são extremamente duros e resistentes a ataque químico tendo em vista que a camada externa é de Ti_2O_3 que tem dureza alta. Outra característica interessante destes coatings é sua excelente aderência pois como os materiais são óxidos aderem bem ao vidro (que também é óxido).

5.4. Filtros passa-banda

Os filtros passa-banda por nós produzidos foram: os filtros passa alto e os filtros passa baixo, todos de materiais óxidos, os quais apresentaremos os seus respectivos resultados.

5.4.1. Filtro passa alto

A tabela 7 mostra as características físicas do filtro passa alto, por nós produzidos no laboratório.

TABELA 7 - Dados para filtro passa alto.

MU	CO	ESP(*)	IR	TS	PO_2
Ti_2O_3	550nm	$\lambda/4$	2.30	250°	3×10E-4torr
SiO_2	550nm	$\lambda/4$	1.45	250°	3×10E-4torr

(*) a primeira e últimas camadas, que são de Ti_2O_3, tem espessura de $\lambda/8$.

A figura 47 mostra a curva experimental para o filtro passa alto, com as características da tabela 7.

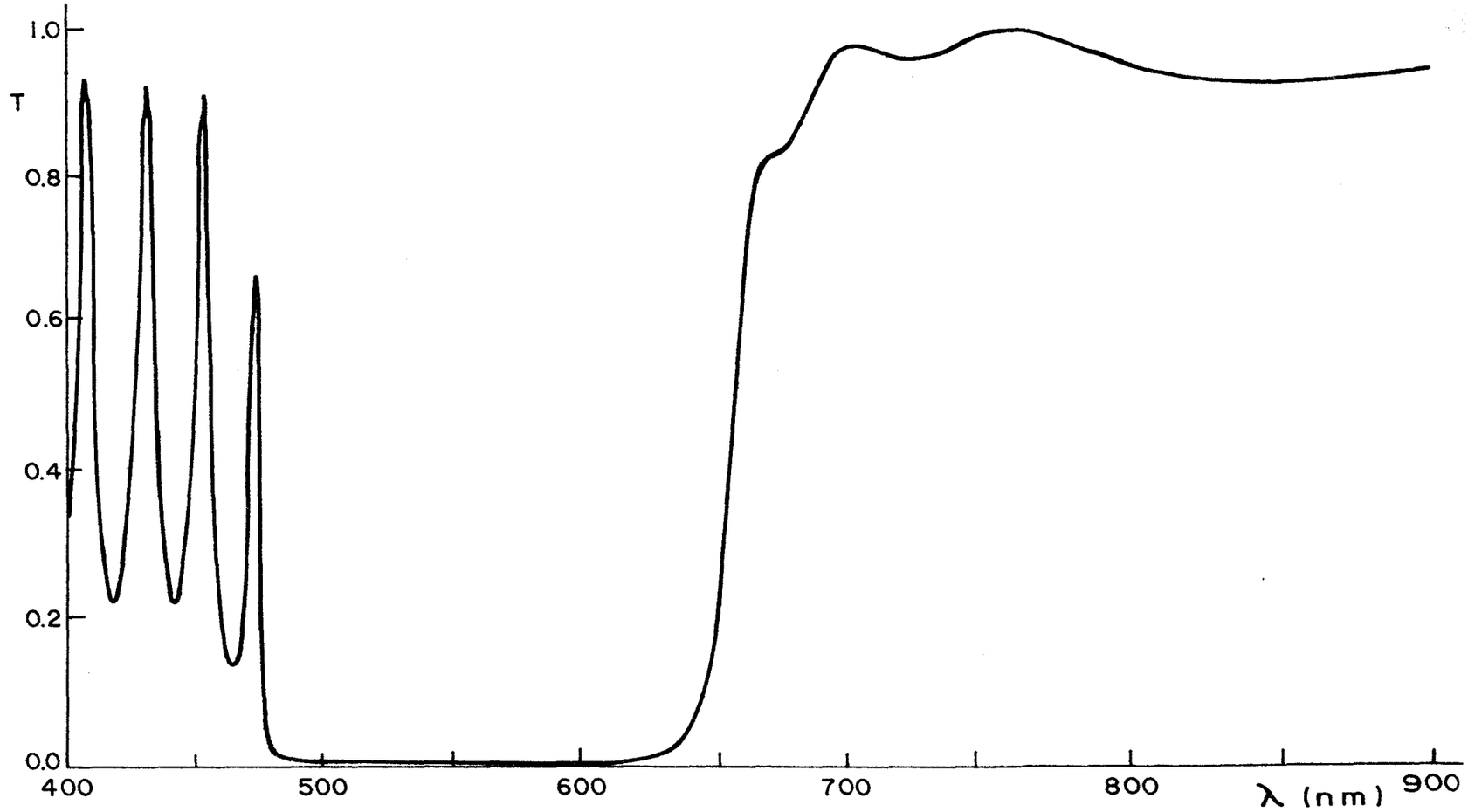


Fig.47 - Curva experimental do filtro passa alto .

Essa figura é semelhante ao cálculo teórico (figura 27), mostrando boa concordância de ambas.

5.4.2. Filtro passa baixo

A tabela 8 mostra as características físicas do filtro passa baixo, por nós produzidos no laboratório.

TABELA 8 - Dados para filtro passa baixo.

MU	CO	ESP(*)	IR	TS	PO_2
Ti_2O_3	700nm	$\lambda/4$	2.30	250^oC	3x10E-4torr
SiO_2	700nm	$\lambda/4$	1.45	250^oC	3x10E-4torr

A figura 48 mostra a curva experimental para o filtro passa baixo, com as características da tabela 8.

(*) A primeira e última camadas, que são de SiO_2, tem espessura de $\lambda/8$.

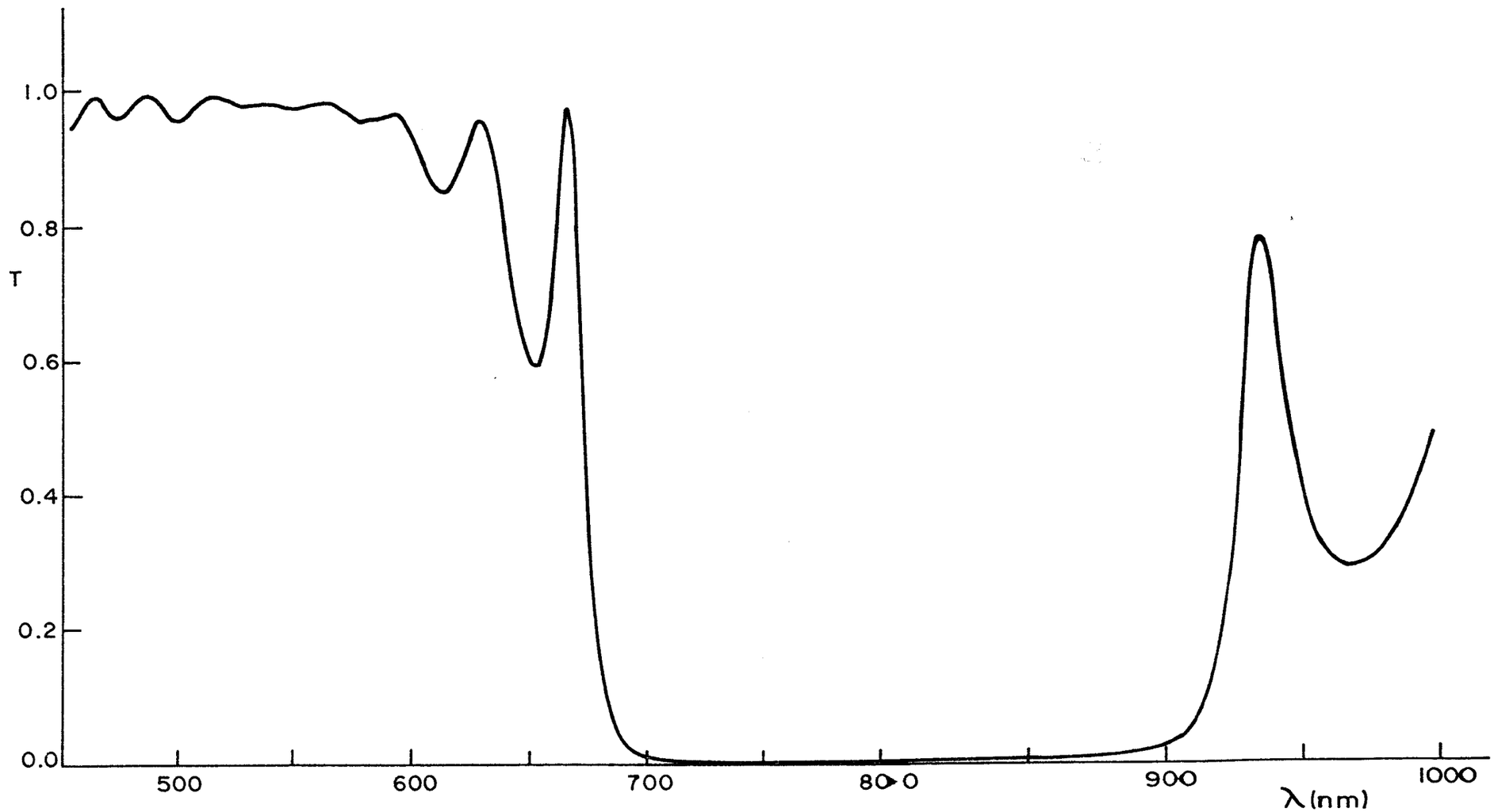


Fig.48 - Curva experimental do filtro passa ba ixo.

Essa figura acima, é semelhante a figura 26, mostrando boa con - cordância de ambas.

5.5. Filtro interferencial

Os filtros interferenciais por nós produzidos foram: os filtros passa banda estreito do tipo metal-dielétrico-metal (MDM), filtros todo dielétrico (ADI) e filtro passa banda de duas meias ondas, os quais apresentaremos os seus respectivos resultados:

5.5.1. Filtro passa banda estreito (MDM)

A tabela 9 mostra as características físicas do filtro passa banda estreito de tipo MDM com resolução $\Delta\lambda$=60 nm e 30nm, por nós produzidos no laboratório.

TABELA 9 - Dados para filtro passa banda estreito (MDM).

MU	CO	ESP1	ESP2	IR	TS	PO_2
MgF_2	590nm	$\lambda/2$	$\lambda/2$	1.38	35^oC	---
Al	590nm	180Å	170Å	(comp.)	35^oC	---

A figura 49 e 50 mostram as curvas experimentais para os filtros passa banda estreita (MDM), com as características da tabela 9.

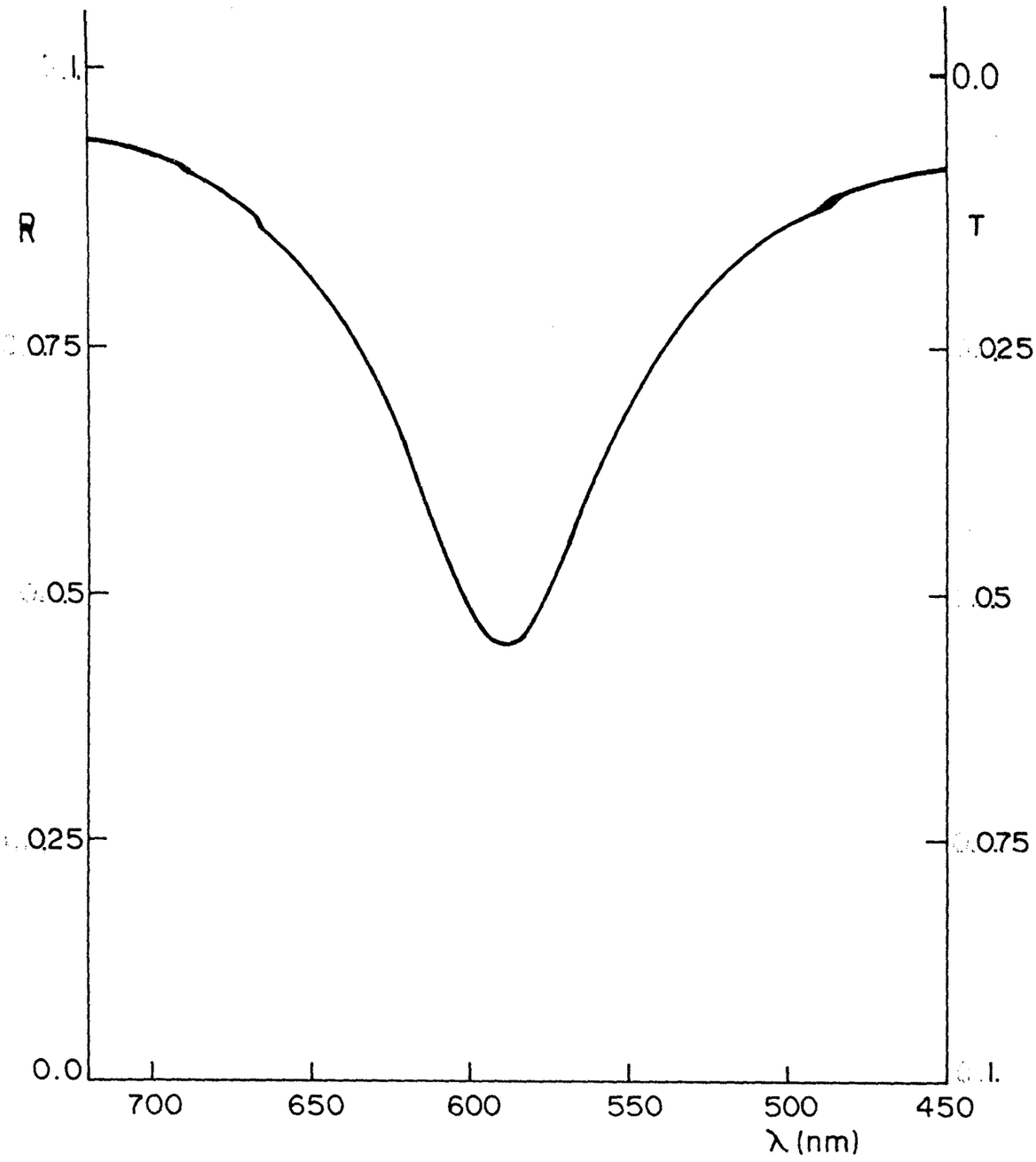


Fig.49- Curva experimental do filtro passa banda estreito (MDM), para $\Delta\lambda$=60nm.

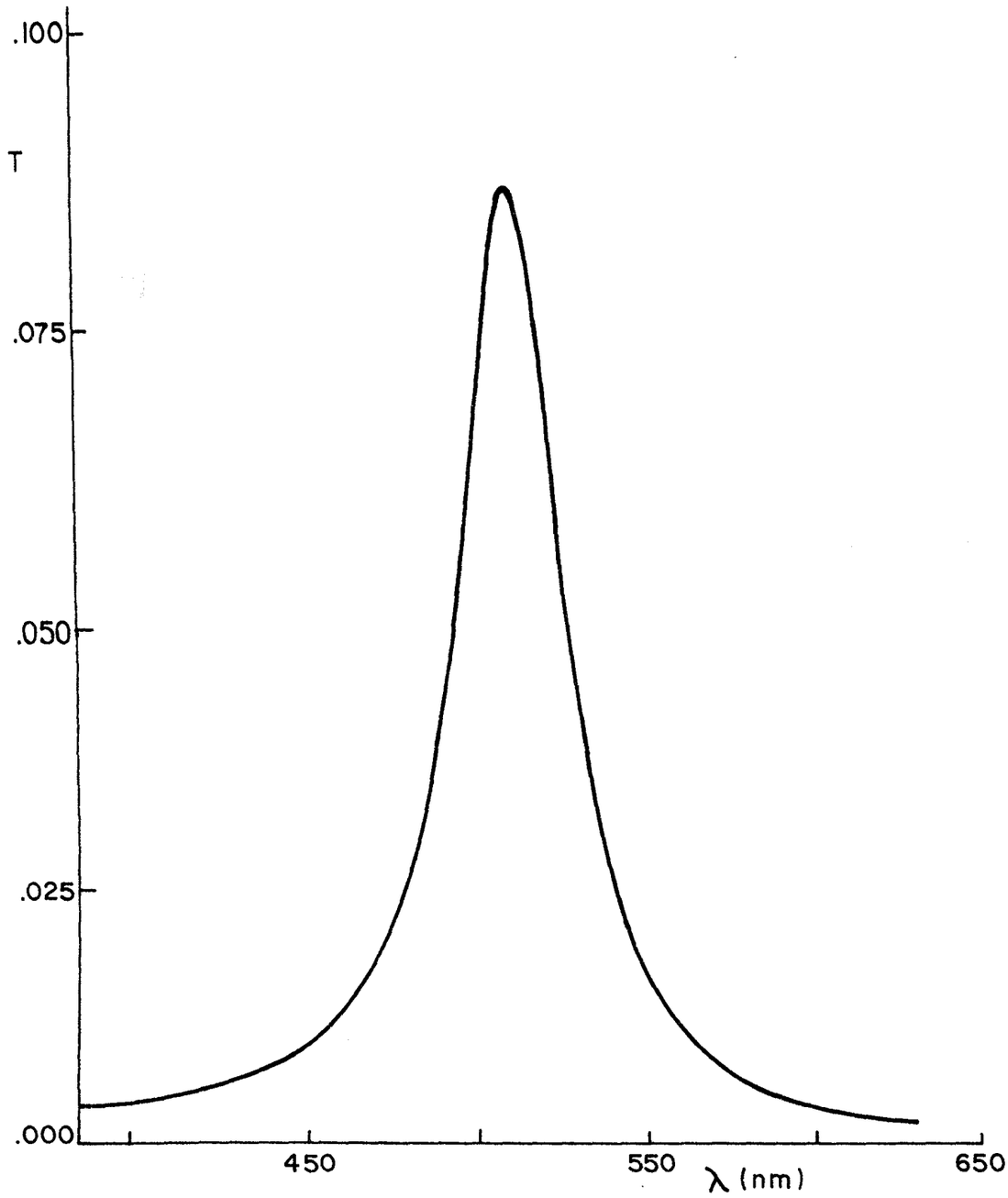


Fig.50- Curva experimental do filtro passa banda estreito (MDM), para $\Delta\lambda$= 30 nm.

Esses tipos de filtros mostram-nos boa concordância com os obtidos teoricamente na figura 30, o que permite comprovação dos nossos cálculos feitos pelo programa FMED.FOR descrito no capítulo II.

5.5.2. Filtro passa banda estreito (ADI)

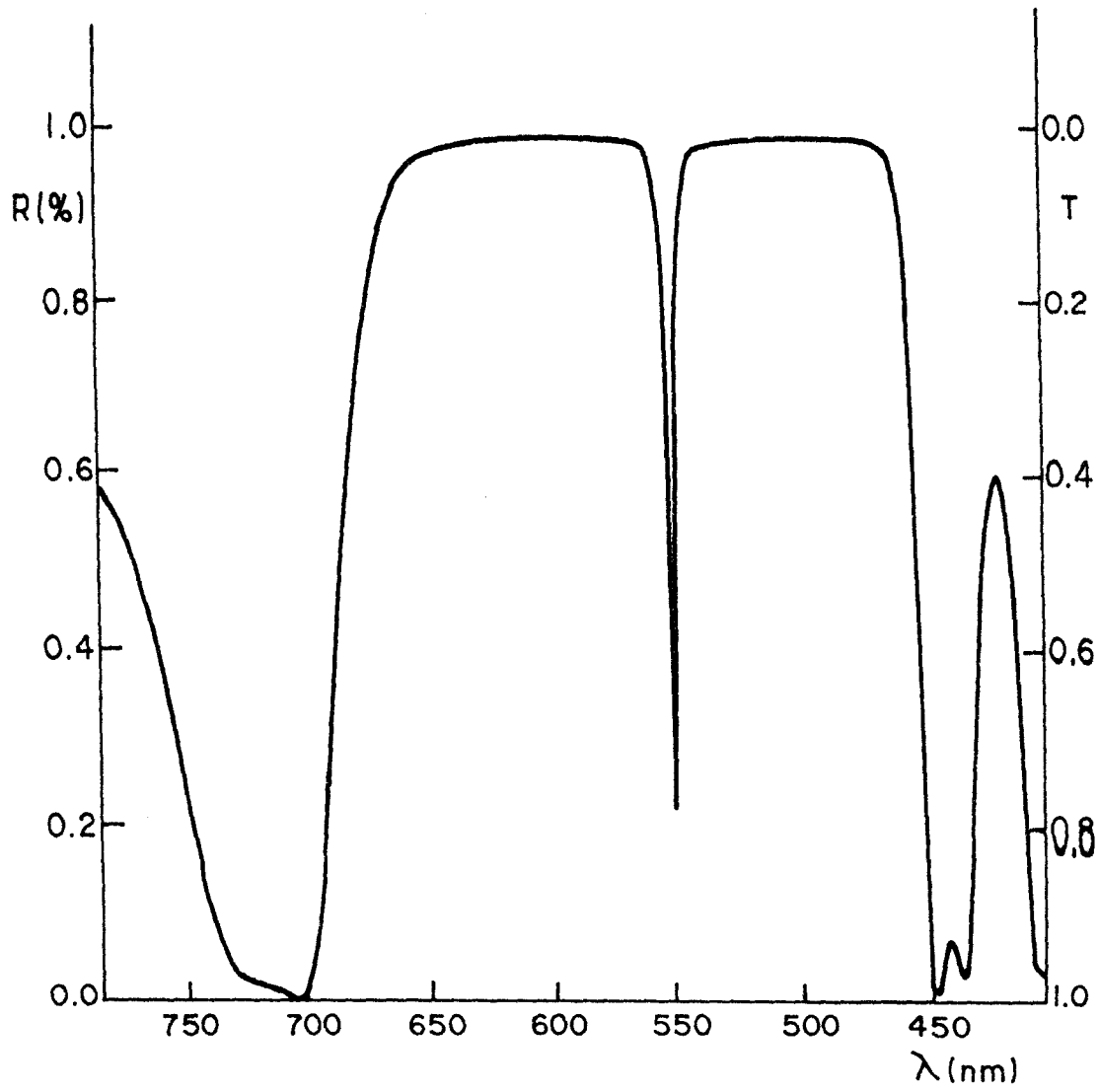
A tabela 10 mostra as características físicas do filtro passa banda estreito de tipo ADI, por nós produzidos no laboratório.

TABELA 10- Dados para filtro passa banda estreito (ADI)

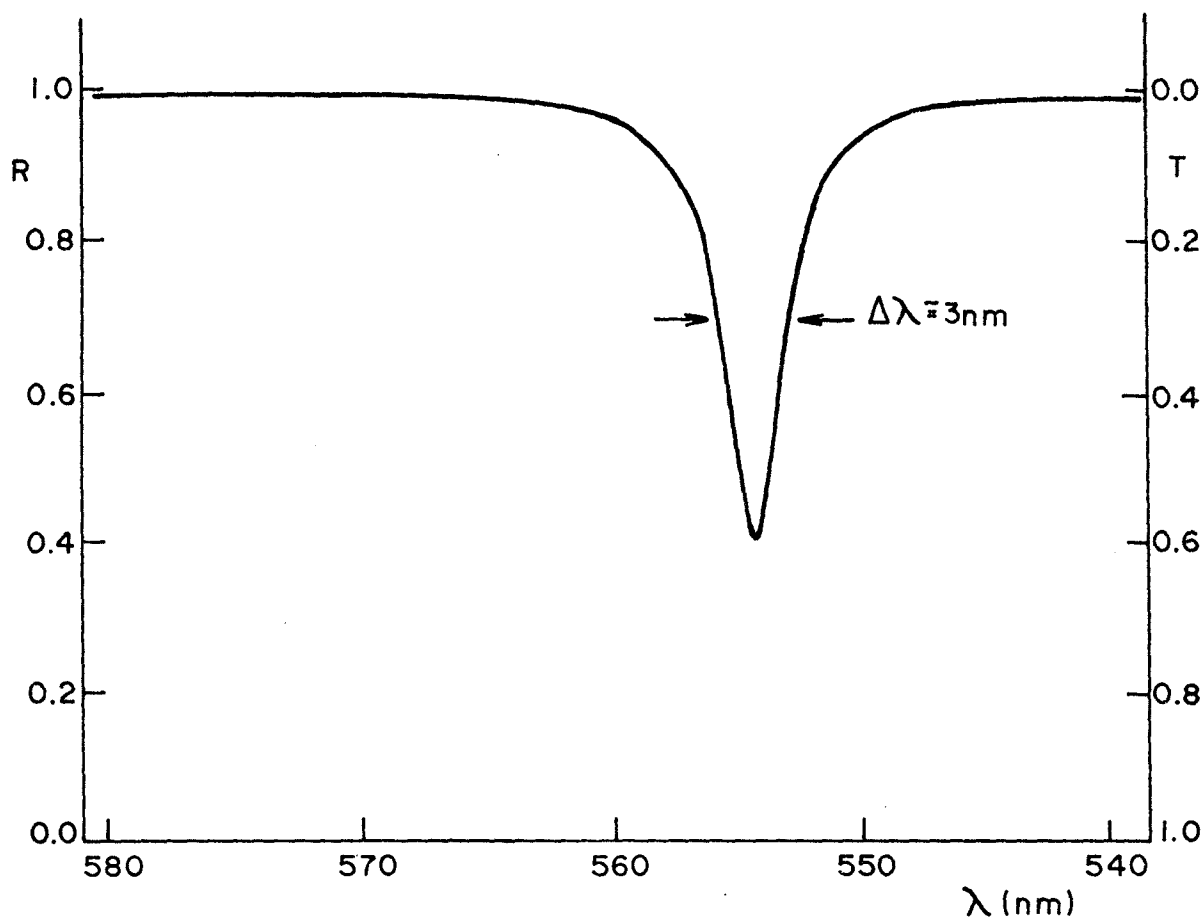
MU	CO	ESP(*)	IR	TS	PO_2
Ti_2O_3	550nm	$\lambda/4$	2.30	250^oC	3×10E-4torr
SiO_2	550nm	$\lambda/4$	1.45	250^oC	3×10E-4torr

A figura 51 mostra a curva experimental para o filtro passa banda estreita (ADI), com as características da tabela 10 .

(*) A camada intermediária de Ti_2O_3 tem espessura $\lambda/2$.



a



b

Fig.51 - a) curva experimental do filtro passa banda estreito (ADI), b) expansão 10 vezes para λ em torno de 559nm.

Esses tipos de filtros mostram-nos boa concordância com os obtidos teoricamente na figura 29, o que permite comprovação dos nossos cálculos feitos pelo programa PFIL.FOR descrito no capítulo II.

5.5.3. Filtro passa banda de duas meias ondas.

Os resultados que se seguem são de um filtro passa banda de duas meias ondas por nós produzidos no laboratório.

A tabela 11 mostra as características físicas do filtro de duas meias ondas.

TABELA 11 - Dados para filtro passa banda duas meias ondas.

MU	CO	IR	TS	PO_2
ZnS	5300Å	2.30	--	--
Na_3AlF_6	5300Å	1.35	--	--

A figura 52 mostra a curva experimental para este filtro. Este é um filtro que não é encontrado na literatura. Tem a característica de transmitir em duas faixas de frequência centradas em 570nm e 600nm e com meia largura de aproximadamente 40Å.

Configuração $V(HL)^3(HH)(LH)^2L(HH)(LH)^3/A$ sendo H e L camadas de espessuras $\lambda/4$.

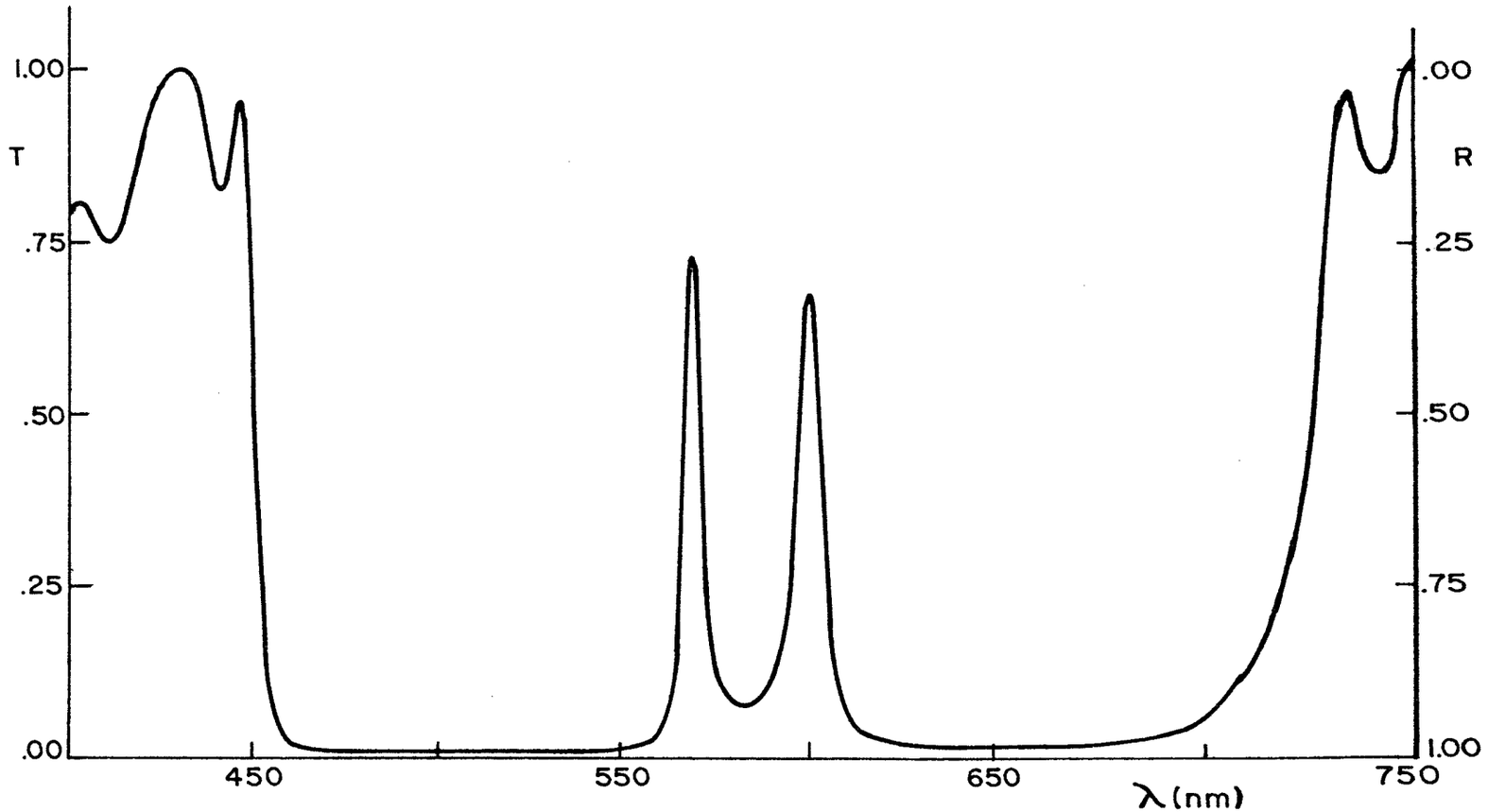


Fig.52 - Curva experimental do filtro de duas meias ondas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Deste trabalho podemos concluir:

1) O estudo teórico de filmes finos por nós feito neste trabalho, permite-nos entender melhor a ótica envolvida no sistema de múltiplas camadas dielétricas e ou metálicas. Desenvolvemos os métodos numéricos e cálculos computacionais, voltados para projetar e graficar os "coatings" descrito nesse trabalho.

2) O estudo teórico está em boa concordância com os resultados experimentais, o que nós dá confiança tanto nos cálculos quanto na tecnologia de evaporação.

A importância desse trabalho se justifica pela necessidade de utilização dos coatings aqui estudados na produção de componentes óticos de alta precisão. Esses componentes são largamente utilizados nas pesquisas de ótica no país e no desenvolvimento de instrumentos óticos de precisão.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerimos aos interessados os seguintes trabalhos:

1) Utilização dos programas computacionais desenvolvidos, para análise e síntese de novos tipos de multi-coatings, como o filtro de duas meias ondas feito por nós.

2) Implementação da técnica de evaporação do NbO2 (produto nacional), para investigar sua utilização nos multi-coatings, e testar em que tipo de sequência ele forma bom coating. Ver quais são suas aplicações em componentes óticos.

3) Modificar os programas para filmes dielétricos de forma a incluir a pequena variação do índice de refração com o comprimento de onda em materiais dielétricos.

APÊNDICE I

Programa PESP

Este Programa é "programa espelho" é utilizado para calcular as espessuras das camadas em espelhos dielétricos, bem como o número de camadas, sendo dado o tipo de polarização, índices refrativos, refletividade, ângulo de incidência e comprimento de onda.

Parâmetros de entrada:

LAMB = comprimento de onda desejado (angstrons)

TE = ângulo de incidência (em graus)

R = refletividade (em porcento de 0. -1.)

NH = índice de refração alto

NL = índice de refração baixo

Tipo de polarização S/P

Parâmetros de saída:

espessura de camada alta (em angstrons)

espessura da camada baixa (em angstrons)

K = número de pares de camadas a serem depositadas.

Para ver o desenvolvimento desse programa veja a sua listagem abaixo.

```
C
C       ESTE PROGRAMA CALCULA A ESPESSURA DAS CAMADAS HIGHT(H) E LOW(L)
C       DE UM FILME FINO DE PERIODO ALTERNADO 1HLHLHLHG, BEM COMO O NU-
C       MERO DE CAMADAS A SEREM DEPOSITADA (K).
C       TENDO COMO SUBSTRATO O VIDRO (GLASS), E DADO OS INDICES DE RE-
C       FRACOES DOS MATERIAIS, COMPRIMENTO DE ONDA, REFLETIVIDADE, E
C       ANGULO DE INCIDENCIA, E TAMBEM O TIPO DE POLARIZACAO.
        BYTE POL
        REAL*4 NH,NL,NA,NG,LAMB
        DATA NA,NG/1.0,1.52/
        DATA POL/1HS/
        DATA PI/3.1415926/
        ARG = PI/180.
        TYPE *,'LAMB,TE E R, NAS UNIDADES: NANOMETRO,GRAU,R(0,- 1.0)'
1       TYPE 100
100     FORMAT('$ LAMB,TE,R,NH,NL = ')
        READ(5,*,END=1000)LAMB,TE,R,NH,NL
        TYPE 300
        ACCEPT 400,POL
300     FORMAT('$ TIPO DE POLARIZACAO [S/P] ? ')
400     FORMAT(1A4)
        TET = TE*ARG
        RXQ = NH*NH
        TRQ = SIN(TET)*SIN(TET)
        QWR = TRQ/RXQ
        PSD = 1. - QWR
        WQR = SQRT(PSD)
        XXH = WQR
        RYQ = NL*NL
        PYD = TRQ/RYQ
        PSY = 1. - PYD
        WQL = SQRT(PSY)
        YYL = WQL
        IF(POL.EQ.1HS) THEN
        POLLA = NH*XXH
        POLAR = NL*YYL
        ELSE
        POLLA = NH/XXH
        POLAR = NL/YYL
        ENDIF
        HH  = LAMB/(4.0*NH*XXH)
        HHA = 10.*HH
        HL  = LAMB/(4.0*NL*YYL)
        HLA = 10.*HL
        RMN = SQRT(R)
        AR1 = 1.-RMN
        AR2 = 1.+RMN
        YY  = LOG10(POLLA/POLAR)
        XX  = LOG10((AR1*NG/AR2))
        K   = NINT(0.5*ABS(XX/YY))
        WRITE(5,200) HHA,HLA,K
200     FORMAT(5X,'ESPESSURA DA CAMADA H (ANGSTRONS) = ',G12.6,/,
        1       5X,'ESPESSURA DA CAMADA L (ANGSTRONS) = ',G12.6,/,
        2       5X,'NUMERO DE PARES DE CAMADAS K      = ',I10)
1000    STOP
        END
```

APÊNDICE II

PROGRAMA PFIL

Este é o programa dos filmes finos em geral. Ele calcula "R(λ)" de forma gráfica ou tabelar, de todos os tipos de coatings descritos no capítulo III. Esse programa é flexível, pois ele é capaz de realizar novos tipos de estruturas para coatings com simples modificações dentre as suas sequências. No momento ele conta com 19 sequências, onde para cada uma dessas sequências temos um tipo particular de filmes finos especializados. Abaixo listamos os tipos de sequências que podem ser utilizadas por este programa com o tipo de coating de sistemas de múltiplas camadas dielétricas que ele faz:

1) $A/(HL)^{K}/V$ (espelhos ou coating A-R)

2) $A/(HL)^{K}H/V$ (espelhos, coating A-R)

3) $A/(0.5H)(LH)^{K}/V$ (espelhos, filtros)

4) $A/(0.5H)(LH)^{K}L/V$ (espelhos dicróicos, filtros)

5) $A/(0.5H)(LH)^{K}L(0.5H)/V$ (filtros)

6) $A/(0.5HL0.5H)^{K}/V$ (filtros)

7) $A/\{H(0.5L)\}^{K}/V$

8) $A/\{(0.5L)H\}^{K}/V$

9) $A(HL)^{K}H(LL)^{K_1}H(LH)^{k}/V$ (filtros de corte)

10) $A/(HL)^{k}(0.5H)/V$

11) $A/(0.5H)L(HL)^{k}(0.5H)/V$

12) $A/(HL)L(LL)^{k_1}H(LH)^{k}H(LL)^{k_1}H(LH)^{k}/V$ (filtro de duas meias onda)

13) $A/(HH)^{K}L(HH)^{K}/V$

14) $A/H(LL)^{K}HLH(LL)^{K}/V$

15) $A/HL(HH)^{K}LHLHL(HH)^{K}LH/V$

16) $A/HLH(LL)^{K}HLHLHLH(LL)^{K}HLH/V$

17) $A/HLHL(HH)^{K}LHLHLHLHL(HH)^{K}LHLH/V$

18) $A/(HLM)^{K}/V$ (TRES materiais)

19) $A/\{HL(0.5M)\}^{K}/V$

Para executar esse programa devemos seguir os seguintes passos:

Login na área FILMES com senha FINOS

1) RUN (nome do programa)

RUN PFIL (programa dos filtros)

2) Em seguida aparece as sequências desejadas de 1 a 19

IE= (coloca-se o número que se deseja)

3) Intervalo desejado

XIN valor inicial do eixo do comp.de onda

XFI valor final do eixo do comp. de onda

PASSO = (XIF-XIN)/ Números de pontos que se deseja que seja plotado.

exemplos: XIN = .4,XFI=1.15,PASSO=,0015 ou

XIN = .65,XFI=1.35,PASSO= .007.

4) Índices de refração, espessura das camadas e número de camadas desejados.

XN1 Índice de refração do primeiro material a ser evaporado.

XN2 índice de refração do segundo material a ser evaporado

XN3 índice de refração do terceiro (caso em que temos 3 tipos de materiais diferentes)

YA1 espessuras das camadas em sequência do tipo (HL) (2.→λ/4,4.→λ/8).

YA2 espessuras das camadas em sequências do tipo (0.5H0.5L)(2.→ λ/4,4. λ/8)

K número de pares de camadas que se deseja em $(HL)^K$

K1 número de pares de camadas (caso de algumas sequências do tipo $(LL)^{K_1}$

5) Aparece a primeira pergunta (deseja ver tabela no vídeo Y/N ?) e em seguida a pergunta (tipo de polarização S/P ?).

6) Segunda pergunta vem logo em seguida (plota o gráfico no vídeo Y/N ?)

7) Terceira pergunta (gráfico 0/1 ?) se coloco sempre zero(0) aparece no vídeo só um gráfico, mas se coloco 0 e depois 1 ficará aparecendo dois gráficos.

8) Após aparecer o gráfico vem a quarta pergunta (quer continuar Y/N ?) se respondermos Y seguem os mesmos passos de 2 até 8.

Estes passos são explicados para que qualquer usuário do VAX possa ter acesso a esse programa.

Damos a seguir algumas considerações gerais sobre esse programa: nas sequências do programa PFIL.FOR do tipo $(HL)^K$ temos:

H = B1 se XN1 = índice de refração maior

L = B2 se XN2 = índice de refração menor ou vice-versa.

enquanto que nas sequências do tipo $(HLM)^K$ temos M=B3 se XN3 = in

dice de refração médio

se XN1 = XN2 então H=L e temos sequências (HH)k ou (LLM) k ou vice-versa

Nas espessuras

YA1 = 2, implica que a espessura é $\lambda/4$ e se YA1=4, esp. $\lambda/8$

YA2 = 2, espessura de camadas (0.5H) é $\lambda/4$ e da mesma forma acima se YA2=4, espessura das camadas é $\lambda/8$

0.5L tem espessura $\lambda/8$ se YA2=4, e tem espessura $\lambda/4$ se YA2 = 2, ou vice-versa.

As sequências de 1 a 19 podem assumir qualquer tipo de coating para sistemas de múltiplas camadas dielétricas.

Como exemplo se faço IE=2 temos um espelho de alta re - fletividade se XN1=1.35, XN2=2.30, XN3=1.0, YA1=2.,YA2=4., K=10 pois a seq.2 é

A/(HL)kH/V ou seja, isto é um espelho de alta refletividade com 21 camadas de materiais de índice alternado (alto e baixo).

Por outro lado a mesma sequência IE=2 pode ser um coating anti-refletor com três camadas $\lambda/4$-$\lambda/4$-$\lambda/4$, para isto basta se escolher XN1=1.35, XN2=2.30, XN3=1,0, YA1=2., YA2=2.,K=1 e temos a sequência A/LHL/V.

Para melhor entendimento do método do cálculo vejamos a listagem desse programa.

```
C
C       PROGRAMA PARA O CALCULO DA REFLETIVIDADE
C       DE UM SISTEMA DE MULTIPLAS CAMADAS DIELETRICAS
C
        PARAMETER IDIM=2000
        IMPLICIT COMPLEX (A-H)
        BYTE POL
        DIMENSION A(2,2),B1(2,2),B2(2,2),B12(2,2),AUX(2,2),AUX1(2,2),
        1 B3(2,2),B4(2,2),AUX1E(2,2),AUX2E(2,2),E(2,1),F(2,1)
        DIMENSION R(IDIM),X(IDIM),T(IDIM)
        INTEGER*2 NPT
        DATA ZERO,UM,USD,PI/0.0,1.0,1.52,3.1415926/
        DATA N,M,L,LL,IANS/2,2,2,1,0/
        ARG = PI/180.
C
C       ENTRADA DOS DADOS
C
C
C                GERA A MATRIZ A
C
        A(1,1) = CMPLX(UM,ZERO)
        A(1,2) = CMPLX(-UM,ZERO)
        A(2,1) = CMPLX(UM,ZERO)
        A(2,2) = CMPLX(UM,ZERO)
        CALL SETVT52
        CALL CLEAR
1       II     = 1
        TYPE 100
        ACCEPT *,IE
        TYPE 200
        ACCEPT *,XIN,XFI,PASSO
        TYPE 210
        ACCEPT 215,POL
        TYPE 220
        ACCEPT 600,IY
        IF(IY.EQ.1HY) IANS=1
        IT     = INT((XFI+(-XIN))/PASSO)+1
        NPT    = IT
        WRITE(4,*) NPT
        X(II)  = XIN
        TYPE 300
        ACCEPT *,XN1,XN2,XN3,TE,YA1,YA2,K
        IC = 1
C
C       INICIO DO CALCULO
C
        TET = TE*ARG
        TMT = SIN(TET)
        TRM = TMT*TMT
        TRM1 = XN1*XN1
        QRS  = TRM/TRM1
        QRS1 = 1. - QRS
        RCM1  = SQRT(QRS1)
        TRM2 = XN2*XN2
        QR2  = TRM/TRM2
        QRST = 1. - QR2
        RCM2 = SQRT(QRST)
        TRM3 = XN3*XN3
        QR3  = TRM/TRM3
        QRSQ = 1. - QR3
        RCM3 = SQRT(QRSQ)
C
C       PARA POLARIZACAO  S
C
```

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP
FÍSICA

```
      IF(POL.EQ.1HS) THEN
      XXN1 = XN1*RCM1
      XXN2 = XN2*RCM2
      XXN3 = XN3*RCM3
      ELSE
C
C     PARA POLARIZACAO  P
C
      XXN1 = XN1/RCM1
      XXN2 = XN2/RCM2
      XXN3 = XN3/RCM3
      ENDIF
      GO TO 3
2     X(II)  = X(II-1)+PASSO
3     DX     = YA1/X(II)
      DY     = YA2/X(II)
      PDX    = PI/DX
      PCO    = COS(PDX)
      PSI    = SIN(PDX)
      PSD1   = PSI/XXN1
      PSM1   = PSI*XXN1
      PSD2   = PSI/XXN2
      PSM2   = PSI*XXN2
      PSD3   = PSI/XXN3
      PSM3   = PSI*XXN3
      PDY    = PI/DY
      PCOY   = COS(PDY)
      PSIY   = SIN(PDY)
      PSD1Y  = PSIY/XXN1
      PSM1Y  = PSIY*XXN1
      PSD2Y  = PSIY/XXN2
      PSM2Y  = PSIY*XXN2
      PSD3Y  = PSIY/XXN3
      PSM3Y  = PSIY*XXN3
C
C               GERA A MATRIZ B1     ( H  OU  L )     * XN1 *
C
      B1(1,1) = CMPLX(PCO,ZERO)
      B1(1,2) = CMPLX(ZERO,PSD1)
      B1(2,1) = CMPLX(ZERO,PSM1)
      B1(2,2) = CMPLX(PCO,ZERO)
C
C               GERA A MATRIZ AUX1E     ( 0.5*H  OU 0.5* L )     * XN1 *
C
      AUX1E(1,1) = CMPLX(PCOY,ZERO)
      AUX1E(1,2) = CMPLX(ZERO,PSD1Y)
      AUX1E(2,1) = CMPLX(ZERO,PSM1Y)
      AUX1E(2,2) = CMPLX(PCOY,ZERO)
C
C               GERA A MATRIZ B2   ( H  OU  L )     * XN2 *
C
      B2(1,1) = CMPLX(PCO,ZERO)
      B2(1,2) = CMPLX(ZERO,PSD2)
      B2(2,1) = CMPLX(ZERO,PSM2)
      B2(2,2) = CMPLX(PCO,ZERO)
C
C               GERA A MATRIZ AUX2E   ( 0.5*H  OU  0.5*L )     * XN2 *
C
      AUX2E(1,1) = CMPLX(PCOY,ZERO)
      AUX2E(1,2) = CMPLX(ZERO,PSD2Y)
      AUX2E(2,1) = CMPLX(ZERO,PSM2Y)
      AUX2E(2,2) = CMPLX(PCOY,ZERO)
C
C              GERA A MATRIZ B3   (H  OU  L  OU  M   )     * XN3 *
C
      B3(1,1)  = CMPLX(PCO,ZERO)
```

```
      B3(1,2)  = CMPLX(ZERO,PSD3)
      B3(2,1)  = CMPLX(ZERO,PSM3)
      B3(2,2)  = CMPLX(PCO,ZERO)
C
C             GERA A MATRIZ B4  (0.5*H OU 0.5*L OU 0.5*M)  * XN3 *
C
      B4(1,1)  = CMPLX(PCOY,ZERO)
      B4(1,2)  = CMPLX(ZERO,PSD3Y)
      B4(2,1)  = CMPLX(ZERO,PSM3Y)
      B4(2,2)  = CMPLX(PCOY,ZERO)
C
C     ESCOLHA DA EQUACAO
C
      GO TO (10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27
     1,28),IE
10    CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
11    CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
12    CALL GMPRDC(A,AUX2E,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
13    CALL GMPRDC(A,AUX2E,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX2E,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX2E,B1,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
14    CALL GMPRDC(A,AUX2E,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B1,B12,N,M,L)
      CALL GMPRDC(B12,AUX2E,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
15    CALL PRODM3(AUX1E,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
16    CALL PRODM (B1,AUX2E,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
17    CALL PRODM (AUX1E,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
18    IF(IC.EQ.1) THEN
         TYPE 400
         ACCEPT *,K1
         IC = 2
      ENDIF
      CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,B12,N,M,L)
      CALL PRODM (B2,B2,AUX,N,M,L,K1)
      CALL GMPRDC(B12,AUX,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,B12,N,M,L)
      CALL PRODM (B2,B1,AUX1,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(B12,AUX1,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
19    CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,AUX1E,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
20    CALL GMPRDC(A,AUX1E,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B2,AUX,N,M,L)
```

```
      CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,AUX1E,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
21    IF(IC.EQ.1) THEN
         TYPE 400
         ACCEPT *,K1
         IC = 2
      ENDIF
      CALL PRODM (B1,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B1,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B2,B2,AUX1E,N,M,L,K1)
      CALL GMPRDC(AUX1,AUX1E,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B1,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B2,B1,AUX2E,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX1,AUX2E,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B1,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,AUX1E,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B1,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,AUX2E,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
22    CALL PRODM (B1,B1,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
23    CALL GMPRDC(A,B1,AUX,N,M,L)
      CALL PRODM (B2,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
24    CALL GMPRDC(A,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B1,B1,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      DO 1010 IL = 1,2
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
1010  CONTINUE
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
25    CALL GMPRDC(A,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL PRODM (B2,B2,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      DO 1020 IL = 1,3
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
1020  CONTINUE
      CALL GMPRDC(AUX,B12,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
26    CALL GMPRDC(A,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
```

```
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL PRODM (B1,B1,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      DO 1030 IL = 1,4
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
1030  CONTINUE
      CALL GMPRDC(AUX1,B12,AUX,N,M,L)
      DO 1040 IL = 1,2
      CALL GMPRDC(AUX,B2,AUX1,N,M,L)
      CALL GMPRDC(AUX1,B1,AUX,N,M,L)
1040  CONTINUE
      GO TO 29
27    CALL PRODM4(B1,B2,B3,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
      GO TO 29
28    CALL PRODM4(B1,B2,B4,B12,N,M,L,K)
      CALL GMPRDC(A,B12,AUX,N,M,L)
C
C                GERA A MATRIZ E
C
29    E(1,1)  = CMPLX(UM,ZERO)
      E(2,1)  = CMPLX(USD,ZERO)
C
C     MULTIPLICA A MATRIZ  AUX  PELA MATRIZ  E
C
      CALL GMPRDC(AUX,E,F,N,M,LL)
      FAUX    = F(1,1)/F(2,1)
      RFR     = REAL (FAUX)
      RFI     = AIMAG(FAUX)
      R(II)   = RFR*RFR+RFI*RFI
      IF(IANS.NE.1) GO TO 30
      TYPE *,II,X(II),R(II)
30    WRITE (4,*) X(II),R(II)
      II      = II+1
      IF(II.LE.IT) GO TO 2
      TYPE 500
      ACCEPT 600,IY
      IF(IY.NE.1HY) GO TO 31
      TYPE 700
      ACCEPT *,IGR
      CALL CLEAR
      CALL PLOT(1,1,IT,X,R,IGR,1)
31    TYPE 800
      ACCEPT 600,IY
      IF(IY.EQ.1HY) GO TO 1
100   FORMAT(' FORNECA O NUMERO DE UMA DAS EQUACOES ABAIXO',/,' 1) (H*
      1L)**K',/,' 2) (H*L)**K*H',/,' 3) (0.5*H)*(L*H)**K',/,' 4) (0.5*
      2H)*(L*H)**K*L',/,' 5) (0.5*H)*(L*H)**K*L*(0.5*H)',/,' 6) (0.5*H
      3*L*0.5*H)**K',/,' 7) (H*0.5*L)**K',/,' 8) (0.5*L*H)**K',/,' 9)
      4(H*L)**K*H*(L*L)**K1*H*(L*H)**K',/,' 10) (H*L)**K*0.5*H',/,' 11
      5) (0.5*H)*L*(H*L)**K*(0.5*H)',/,' 12) (H*L)**K*H*(L*L)**K1*H*(L
      6*H)**K*H*(L*L)**K1*H*(L*H)**K',/,' 13) (H*H)**K*L*(H*H)**K',/,'
      7 14) H*(L*L)**K*H*L*H*(L*L)**K*H',/,' 15) H*L*(H*H)**K*L*H*L*H*
      8L*(H*H)**K*L*H',/,' 16) H*L*H*(L*L)**K*H*L*H*L*H*L*H*(L*L)**K*H
      9*L*H',/,' 17) H*L*H*L*(H*H)**K*L*H*L*H*L*H*L*H*L*(H*H)**K*L*H*L
      1*H',/,' 18) (H*L*M)**K',/,' 19) (H*L*0.5*M)**K',/,'$ IE = ')
200   FORMAT('$ XIN,XFIN,PASSO = ')
210   FORMAT('$ TIPO DE POLARIZACAO [S/P] ? ')
215   FORMAT(1A1)
220   FORMAT('$ LISTA TABELA NO VIDEO [Y/N] ? ')
300   FORMAT('$ XN1,XN2,XN3,TE,YA1,YA2,K = ')
400   FORMAT('$ K1  = ')
500   FORMAT('$ PLOTA GRAFICO NO VIDEO [Y/N] ? ')
```

```
600     FORMAT(1A4)
700     FORMAT('$ GRAFICO [0/1] ? ')
800     FORMAT('$ QUER CONTINUAR [Y/N] ? ')
        STOP
        END
        SUBROUTINE PRODM(H1,H2,AR,N,M,L,K)
        IMPLICIT COMPLEX (A-H)
        DIMENSION H1(2,2),H2(2,2),G1(2,2),G2(2,2),AR(2,2)
        CALL GMPRDC(H1,H2,AR,N,M,L)
        IF(K.EQ.1) GO TO 100
C
C       MULTIPLICA A MATRIZ  H1  PELA MATRIZ  H2  ( K ) VEZES
C       PARA  K > 1
C
        DO 1 I = 1, N
        DO 1 J = 1, M
        G1(I,J)=AR(I,J)
        G2(I,J)=AR(I,J)
1       CONTINUE
        DO 3 KK = 2, K
        CALL GMPRDC(G1,G2,AR,N,M,L)
        IF(KK.EQ.K) GO TO 3
        DO 2 I = 1, N
        DO 2 J = 1, M
        G1(I,J)=AR(I,J)
2       CONTINUE
3       CONTINUE
100     RETURN
        END
        SUBROUTINE PRODM3(H1,H2,AR,N,M,L,K)
        IMPLICIT COMPLEX (A-H)
        DIMENSION H1(2,2),H2(2,2),G1(2,2),G2(2,2),AR(2,2)
        CALL GMPRDC(H1,H2,G1,N,M,L)
        CALL GMPRDC(G1,H2,AR,N,M,L)
        IF(K.EQ.1) GO TO 100
C
C       MULTIPLICA A MATRIZ H1  PELA MATRIZ  H2  E O RESULTADO
C       MULTIPLICA NOVAMENTE PELA MATRIZ  H1  (  K ) VEZES
C       PARA  K > 1
C
        DO 1 I = 1, N
        DO 1 J = 1, M
        G1(I,J)=AR(I,J)
        G2(I,J)=AR(I,J)
1       CONTINUE
        DO 3 KK = 2, K
        CALL GMPRDC(G1,G2,AR,N,M,L)
        IF(KK.EQ.K) GO TO 3
        DO 2 I = 1, N
        DO 2 J = 1, M
        G1(I,J)=AR(I,J)
2       CONTINUE
3       CONTINUE
100     RETURN
        END
        SUBROUTINE PRODM4(H1,H2,H3,AR,N,M,L,K)
        IMPLICIT COMPLEX (A-H)
        DIMENSION H1(2,2),H2(2,2),H3(2,2),G1(2,2),G2(2,2),AR(2,2)
        CALL GMPRDC(H1,H2,G1,N,M,L)
        CALL GMPRDC(G1,H3,AR,N,M,L)
        IF(K.EQ.1) GO TO 100
C
C       MULTIPLICA A MATRIZ H1 PELA MATRIZ H2 E O RESULTADO
C       MULTIPLICA NOVAMENTE PELA MATRIZ H3 ( K ) VEZES
C       PARA  K > 1
C
```

```
      DO 1 I = 1,N
      DO 1 J = 1,M
      G1(I,J) = AR(I,J)
      G2(I,J) = AR(I,J)
1     CONTINUE
      DO 3 KK = 2, K
      CALL GMPRDC(G1,G2,AR,N,M,L)
      IF(KK.EQ.K) GO TO 3
      DO 2 I = 1, N
      DO 2 J = 1, M
      G1(I,J) = AR(I,J)
2     CONTINUE
3     CONTINUE
100   RETURN
      END
```

APÊNDICE III

Programa FMED

Este é o programa de filtros Metais/Dielétricos, o qual calcula a refletividade, a transmissividade e a absorção de um sistema de múltiplas camadas metálicas, metálicas/dielétricas ou só dielétricas, sendo dado os seguintes parâmetros de entrada: comprimento de onda, índice de refração Re(n) e Im(k) para cada tipo de material metálico ou dielétrico utilizado. Para executarmos este programa devemos proceder da seguinte maneira: crio um arquivo nome.DAT com comprimento de onda, n1,k1,n2,k2 nesta ordem, em seguida ASS nome. DAT FOR001, depois disto RUN FMED, e surge as perguntas:

Nº de termos do fit Polinomial (N=3) a função é quadrática

comprimento de onda máximo, comprimento de onda mínimo , incremento

espessuras das camadas do metal, dielétrica que deseja.

Logo após estes passos aparecerá no vídeo o gráfico teórico calculado por este programa com a pergunta:

Salva para o camcop(Y/N), se responde Y ele cria um arquivo FOR004.DAT para o PLOT, e caso respondo N ele cria um arquivo PRINT.LIS com os valores calculados em forma de tabela da refletividade, transmissividade e absorção nesta ordem.

Agora apresentaremos algumas considerações importantes sobre esse programa:

Esse programa funciona de três maneiras distintas, a qual citaremos a seguir:

a) Só metálico (n1,k1,n2,k2 metais) neste caso temos um sistema de camadas M1M2M1M2...

b) Metal/dielétrico, (n1,k1 metal) e (n2,k2 dielétrico), e neste caso temos sistemas MDMDM...

c) só dielétrico (n1,k1=0,n2,k2=0) (dielétrico), neste caso temos sistemas de múltiplas camadas dielétricas de índice alternados HLHLHL..., como no programa PFIL.FOR descrito acima.

Mas objetivo principal desse programa FMED.FOR é cálculo de filtros interferenciais MDM (Metal-dielétrico-metal) caso b) mostrado acima.

Para melhor visão do método do cálculo do programa FMED vejamos a sua listagem nas páginas que se seguem.

```
C
C       PROGRAMA PARA CALCULO DA REFLEXAO,TRANSMISSAO E ABSORCAO
C       DE FILMES FINOS METALICO E DIELETRICO
C
        IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
        DIMENSION ALAMBL(1000),AN(1000,10),AK(1000,10),ALAMB(1000),ALN1(1000)
        1,ALK1(1000),ALN2(1000),ALK2(1000)
        COMMON /TR1/ ALAMB,AN,AK
        COMMON /TR2/ NDMAX,AN0,AK0,ANDMAX,AKDMAX,NP1
        DATA NDMAX/3/,AN0,AK0,ANDMAX,AKDMAX/1.0,0.0,1.52,0.0/
        TYPE 100
        ACCEPT *,NTERMS
        TYPE 110
        ACCEPT *,ALAMAX,ALAMIN,DELL
        NP = (ALAMAX-ALAMIN)/DELL !NUMERO DE PONTOS
        DO 1 I=1,1000
        READ(1,*,END=2)ALAMBL(I),ALN1(I),ALK1(I),ALN2(I),ALK2(I)
1       CONTINUE
2       NPL = I-1
        DO 3 I=0,NP
        ALINC = ALAMAX - DELL*I
        CALL INTERP(ALAMBL,ALN1,NPL,NTERMS,ALINC,OUTN1)
        CALL INTERP(ALAMBL,ALK1,NPL,NTERMS,ALINC,OUTK1)
        CALL INTERP(ALAMBL,ALN2,NPL,NTERMS,ALINC,OUTN2)
        CALL INTERP(ALAMBL,ALK2,NPL,NTERMS,ALINC,OUTK2)
        ALAMB(I+1) = ALINC
        AN(I+1,1) = OUTN1
        AK(I+1,1) = OUTK1
        AN(I+1,2) = OUTN2
        AK(I+1,2) = OUTK2
3       CONTINUE
        NP1=NP+1
        CALL FILMED
100     FORMAT('$ ENTRE COM O NUMERO DE TERMOS NTERMS = ')
110     FORMAT('$ LAMBDA MAX.,LAMBDA MIN.,DELTA LAMBDA(ANGSTRONS) = ')
        STOP
        END
        SUBROUTINE FILMED

        IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
        COMMON /TR1/ ALAMB,AN,AK
        COMMON /TR2/ NDMAX,AN0,AK0,ANDMAX,AKDMAX,N
        INTEGER*2 NPTT
        DIMENSION D(1000),AN(1000,10),AK(1000,10),ALAMB(1000),AGAMA(1000)
        1,ALFA(1000),AG(1000),AH(1000),TDQ(1000),AP(1000),AQ(1000),AR(1000),
        1AS(1000),AT(1000),AU(1000),AV(1000),AW(1000),BP(1000),BQ(1000),
        1BS(1000),BT(1000),BU(1000),BV(1000),BW(1000),REF(1000),TRANS(1000),
        1ABSOR(1000),BR(1000)
        TYPE 10
10      FORMAT('$ ESPESSURA (ME,D)[ANGSTRONS] = ')
        ACCEPT *,(D(ID),ID=1,2)
        DO 70 ID=3,NDMAX,2
        D(ID)=D(1)
        IF(ID.EQ.NDMAX)GOTO 70
        D(ID+1)=D(2)
70      CONTINUE
        DO 80 I=1,N
        DO 80 ID=3,NDMAX,2
        AN(I,ID)=AN(I,1)
        AK(I,ID)=AK(I,1)
```

```
      IF(ID.EQ.NDMAX)GOTO 80
      AN(I,ID+1)=AN(I,2)
      AK(I,ID+1)=AK(I,2)
80    CONTINUE
      DOISPI=2.*3.1415926

      DO 100 I=1,N
C
C     INICIO DO CALCULO
C
      AG(1)=(AN0**2 -AN(I,1)**2 -AK(I,1)**2)/((AN0 +AN(I,1))**2
     1+AK(I,1)**2)
      AH(1)=2.*AN0*AK(I,1)/((AN0+AN(I,1))**2+AK(I,1)**2)
      BP(1) = 1.
      BQ(1) = 0.
      BR(1) = AG(1)
      BS(1) = AH(1)
      BT(1) = AG(1)
      BU(1) = AH(1)
      BV(1) = 1.
      BW(1) = 0.
      AN(I,NDMAX+1)=ANDMAX
      AK(I,NDMAX+1)=AKDMAX
      T = (1. + AG(1))**2 + AH(1)**2
      DO 200 J=2,NDMAX+1
      AGAMA(J-1) = DOISPI*AN(I,J-1)*D(J-1)/ALAMB(I)
      ALFA(J-1)  = DOISPI*AK(I,J-1)*D(J-1)/ALAMB(I)
      AG(J) =(AN(I,J-1)**2+AK(I,J-1)**2-AN(I,J)**2-AK(I,J)**2)/
     1((AN(I,J-1)+AN(I,J))**2+(AK(I,J-1)+AK(I,J))**2)
      AH(J) = 2.*(AN(I,J-1)*AK(I,J)-AN(I,J)*AK(I,J-1))/
     1((AN(I,J-1)+AN(I,J))**2+(AK(I,J-1)+AK(I,J))**2)
      TDQ(J) = (1. + AG(J))**2 + AH(J)**2
      T = T*TDQ(J)
      EXPA = EXP(ALFA(J-1))
      COSG = COS(AGAMA(J-1))
      SING = SIN(AGAMA(J-1))
      AP(J) = EXPA*COSG
      AQ(J) = EXPA*SING
      AR(J) = EXPA*(AG(J)*COSG-AH(J)*SING)
      AS(J) = EXPA*(AH(J)*COSG+AG(J)*SING)
      AT(J) = (AG(J)*COSG+AH(J)*SING)/EXPA
      AU(J) = (AH(J)*COSG-AG(J)*SING)/EXPA
      AV(J) = COSG/EXPA
      AW(J) = -SING/EXPA
      IF(NDMAX.EQ.1) GOTO 380

200   CONTINUE

380   DO 300 K=1,NDMAX

      BP(K+1) = BP(K)*AP(K+1)-BQ(K)*AQ(K+1)+BR(K)*AT(K+1)-BS(K)
     1*AU(K+1)
      BQ(K+1) = BQ(K)*AP(K+1)+BP(K)*AQ(K+1)+BS(K)*AT(K+1)+BR(K)
     1*AU(K+1)
      BR(K+1) = BP(K)*AR(K+1)-BQ(K)*AS(K+1)+BR(K)*AV(K+1)-BS(K)
     1*AW(K+1)
      BS(K+1) = BQ(K)*AR(K+1)+BP(K)*AS(K+1)+BS(K)*AV(K+1)+BR(K)
     1*AW(K+1)
      BT(K+1) = BT(K)*AP(K+1)-BU(K)*AQ(K+1)+BV(K)*AT(K+1)-BW(K)
     1*AU(K+1)
      BU(K+1) = BU(K)*AP(K+1)+BT(K)*AQ(K+1)+BW(K)*AT(K+1)+BV(K)
     1*AU(K+1)
      BV(K+1) = BT(K)*AR(K+1)-BU(K)*AS(K+1)+BV(K)*AV(K+1)-BW(K)
     1*AW(K+1)
      BW(K+1) = BU(K)*AR(K+1)+BT(K)*AS(K+1)+BW(K)*AV(K+1)+BV(K)
     1*AW(K+1)
```

```
300     CONTINUE
C
C       CALCULO DA REFLETIVIDADE
C
        EOQ = BP(NDMAX+1)**2 + BQ(NDMAX+1)**2
        REF(I) = (BT(NDMAX+1)**2 + BU(NDMAX+1)**2)/EOQ
C
C       CALCULO DA TRANSMISSAO
C
        TRANS(I) = T*ANDMAX/EOQ
C
C       CALCULO DA ABSORCAO
C
        ABSOR(I) = 1.0 - REF(I) - TRANS(I)

        WRITE(6,400)ALAMB(I),REF(I),TRANS(I),ABSOR(I)
400     FORMAT(5X,F14.6,5X,F9.6,5X,F9.6,5X,F9.6)
100     CONTINUE
        CALL PLT55(1,1,N,ALAMB,TRANS,1,1)
        TYPE 777
777     FORMAT('$ SALVA PARA O CALCOMP [Y/N] ?')
        ACCEPT 888, ANSW
888     FORMAT(A4)
        IF(ANSW.NE.'Y') STOP
        NPTT = N
        WRITE(4,*)NPTT
        DO 50 I=1,N
        WRITE(4,*)ALAMB(I),TRANS(I)
50      CONTINUE
        STOP
        END

        SUBROUTINE INTERP(X,Y,NPTS,NTERMS,XIN,YOUT)
        IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
        DIMENSION X(1),Y(1)
        DIMENSION DELTA(1000),A(1000)
C
11      DO 19 I=1,NPTS
        IF(XIN-X(I))13,17,19
13      I1=I-NTERMS/2
        IF(I1)15,15,21
15      I1=1
        GOTO 21
17      YOUT=Y(I)
18      GO TO 61
19      CONTINUE
        I1=NPTS-NTERMS+1
21      I2=I1+NTERMS-1
        IF(NPTS-I2)23,31,31
23      I2=NPTS
        I1=I2-NTERMS+1
25      IF(I1)26,26,31
26      I1=1
27      NTERMS=I2-I1+1
```

```
31      DENOM=X(I1+1)-X(I1)
        DELTAX=(XIN-X(I1))/DENOM
        DO 35 I=1,NTERMS
        IX=I1+I-1
35      DELTA(I)=(X(IX)-X(I1))/DENOM

40      A(1)=Y(I1)
41      DO 50 K=2,NTERMS
        PROD=1.
        SUM=0.
        IMAX=K-1
        IXMAX=I1+IMAX
        DO 49 I=1,IMAX
        J=K-I
        PROD=PROD*(DELTA(K)-DELTA(J))
49      SUM=SUM-A(J)/PROD
50      A(K)=SUM+Y(IXMAX)/PROD

51      SUM=A(1)
        DO 57 J=2,NTERMS
        PROD=1.
        IMAX=J-1
        DO 56 I=1,IMAX
56      PROD=PROD*(DELTAX-DELTA(I))
57      SUM=SUM+A(J)*PROD
60      YOUT=SUM
61      RETURN
        END
$
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Berning,P.H. Theory and Calculation of Optical Thin Films, in Physics of Thin Films. Vol.1(1963). Academic Press , Edited by Georg Hass.

(2) Knittel,Z. Optics Thin Films. Academic Press, (1976).

(3) Klein,M.V. Optics. John Wiley Sons (1969).

(4) Zajac,H. Optics. John Wiley Sons (1979).

(5) Jackson,J.D. Classical Electrodynamics. 2a.edição, John Wiley Sons (1976).

(6) Heavens,O.S. Optical Properties of Thin Solid Films. Dover Publications, (1955).

(7) Abelès,F. Optical Properties of Metallic Films, in Physics of Thin Films. vol.6, (1971), Academic Press, edited by Georg Hass.

(8) Lissberger,P.H. Optical Applications of Dielectric. Rep. on Prog.in Physics, vol.33, parte 1 (1970).

(9) MacDonald,J. Metal-Dielectric Multilayers. Applied Optical, nº 4, (1971).

(10) Philips,R.B. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. McGraw-Hill, Inc. (1969).

(11) Baumeister,P. Interference and Optical Interference Coatings. Cap.8, (1960).

(12) Thelen,A. Design of Multilayer Interference Fliters, in Physics of Thin Films. vol.5 (1969), Academic Press , edited by Georg Hass.

(13) Thelen,A., Cox.J.T., Hass,G. J.Opt.Soc.Am.,52,965(1962).

(14) Heavens,O.S. Measurement of Optical Constants of Thin Films and Cox,J.T, and Hass,G. Antireflection Coating for Optical and Infrared Optical Materials, in Physics of Thin Films. vol.2(1964), Academic Press, edited by Georg Hass.

(15) Heavens,O.S. Thin Films Physics, Science Paperbacks,(1970).