Hugo Puertas de Araújo

Obtenção e caracterização de filtros Fabry-Perot para aplicação em aquisição de imagens de diferença de polarização

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

São Paulo
2004

CONSULTA
FT-2052
Ed.rev.

Hugo Puertas de Araújo

Obtenção e caracterização de filtros Fabry-Perot para aplicação em aquisição de imagens de diferença de polarização

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Microeletrônica

Orientador:
Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho

São Paulo
2004

DEDALUS - Acervo - EPBC

31200033452

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de fevereiro de 2005.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador Sebastião Jomas dos Santos Filho

FICHA CATALOGRÁFICA

Araújo, Hugo Puertas de
Obtenção e caracterização de filtros Fabry-Perot para aplicação em aquisição de imagens de diferença de polarização / H.P. de Araújo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2005.
195 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Processamento de imagens 2.Filmes finos 3.Microeletrônica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

BC
Universidade de São Paulo
Biblioteca da Escola Politécnica

FT- 2052
Ed. rev.

À Fernanda, cujo apoio nos momentos difíceis foi crucial para me manter seguindo sempre em frente.

AGRADECIMENTOS

À minha família sem cujo apoio eu nunca teria chegado aonde cheguei.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho, que bem soube estar presente em todos os momentos, contribuindo de forma real para o bom andamento e conclusão deste trabalho.

Ao Dr. Márcio de Almeida Valle, pelas deposições realizadas no equipamento de *sputtering* do LME para a obtenção dos filmes finos utilizados neste trabalho, bem como pelas proveitosas conversas.

Aos professores do LACIFID José Fernando Diniz Chubaci, Susana Oliveira Sousa e Lara Helena Elerbrock dos Santos, pela orientação e apoio no uso do espectrofotômetro, equipamento essencial para as caracterizações ópticas.

Ao amigo Marcos Paulo pela ajuda em algumas das experiências efetuadas.

Aos técnicos Vinícius, Marcel e Marcos do LAMFI pelas análises de RBS e pelo apoio para a interpretação das mesmas.

Aos meus colegas e amigos do LSI cujas discussões e opiniões muito me ajudaram.

À FAPESP pelo suporte financeiro.

A todos os que, direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho, investigamos algumas propriedades e aplicações para imagens de diferença de polarização (PDI's) propondo dois sistemas de aquisição destas imagens como alternativas à arquitetura proposta por Tyo (1996). O primeiro sistema aqui abordado faz uso de duas câmeras e dois polarizadores para a obtenção de PDI's. A redundância, em termos de elementos de aquisição de imagens, visa suprir uma deficiência do sistema supracitado, qual seja a sua impossibilidade de operar em tempo real. O segundo projeto propõe a utilização de filtros polarizadores baseados em implementações de estruturas Fabry-Perot utilizando-se filmes finos birrefringentes de TiO_x, como elemento principal de um dispositivo que possa ser produzido na forma de um microssistema integrado de aquisição de imagens completamente compatível com as tecnologias de produção CMOS disponíveis hoje em dia. Dadas as possibilidades envolvendo esse último projeto, definimos como objetivo principal deste trabalho a obtenção de filtros polarizadores baseados em tecnologia de filmes finos birrefringentes, que foram obtidos por deposição física num equipamento de *Sputtering* DC. Na etapa de análise dos dados, foram feitas caracterizações ópticas (espectrofotometria) e RBS tanto dos filtros finais quanto dos filmes de TiO_x, que foram ensaiados previamente para a extração de parâmetros necessários para o projeto dos filtros de interferência. Conclui-se o trabalho comprovando a possibilidade de se obter filtros polarizadores que possam ser utilizados em sistemas integrados de aquisição de imagens, mas ressalva-se que o equipamento de *Sputtering* DC empregado não é o ideal para essa aplicação, sugerindo-se o uso de equipamentos capazes de monitorar espessura e índices de refração durante o processo de deposição dos filmes (um exemplo seria um sistema de deposição por *e-beam* acoplado a um elipsômetro de transmitância).

ABSTRACT

In the present work, it was investigated some properties and applications for polarization-difference images (PDI's), what led us to the proposition of two acquisition systems for such images as alternatives to the architecture proposed by Tyo (1996). The first system here discussed uses two cameras and two polarizers in the attainment of PDI's. The image elements redundancy is supposed to overcome a deficiency of the above-mentioned system that is its inability to operate in real time. The second project proposes the use of polarizing filters based on Fabry-Perot structures obtained with birefringent thin films of TiO_x. Such filters are the key elements in a device that can be implemented as an integrated microsystem, fully compatible with the CMOS production technologies, available nowadays. Given the possibilities associated with this last project, it was defined as the main goal of this work, the attainment of polarizing filters based on birefringent thin films technology, physically deposited by a DC Sputtering equipment. During the phase of data analysis, it was carried out optical characterizations (spectrofotometry) as well as RBS analysis, both for the filters itself and for the TiO_x films, that were previously investigated in order to determine the required parameters for the design of the interference filters. This work is concluded by proving the possibility of using polarizing filters in integrated image acquisition systems, but a remark is made stating that the employed equipment is not the ideal one for such applications and it is suggested the use of deposition set up capable to monitor thickness and refractive indexes during the run (an example would be an e-beam equipment connected to a transmittance ellipsometer).

Sumário

LISTA DE FIGURAS i
LISTA DE TABELAS vi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS viii
LISTA DE SÍMBOLOS x
1 – INTRODUÇÃO 1
1.1 – Propostas e justificativas 4
1.2 – Objetivos 6
1.3 – Organização da tese 7
2 – BIRREFRINGÊNCIA 8
2.1 – Birrefringência de forma 9
2.2 – Estrutura colunar em filmes finos 11
2.3 – Obtenção de materiais birrefringentes por e-beam 13
3 – IMAGENS DE DIFERENÇA DE POLARIZAÇÃO DA LUZ (PDI) 19
3.1 – Características das PDI's 21
3.2 – Aplicações 22
3.3 – Um esquema para obtenção de PDI's 22
3.3.1 – PDI em cores 24
3.4 – Um microssistema integrado 27
3.5 – Polarização da luz 30
4 – SIMULAÇÕES 43
4.1 Simulações de filmes metálicos 44
4.2 Simulações do TiO_2 como material birrefringente 48
4.3 Simulações dos filtros de interferência 50
4.4 Conclusões sobre a etapa de simulações iniciais 56
5 – PROJETO DOS FILTROS DE INTERFERÊNCIA 59
6 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS: OBTENÇÃO DE FILMES DE TiO_x E IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS POLARIZADORES 69
6.1 – Obtenção de filmes de TiO_x por DC *Sputtering* 69
6.2 – Procedimento e receitas para implementação de filtros Fabry-Perot 74
7 – RESULTADOS E DISCUSSÕES 79
7.1 – Imagens de diferença de polarização (PDI's) 79
7.1.1 – Imagens de diferença de polarização utilizando a técnica de aquisição seqüencial no tempo 79
7.1.2 – Imagens de diferença de polarização utilizando a técnica de aquisição multiplexada 88
7.2 – Caracterização dos filmes de TiO_x 102
7.2.1 – Espectrofotometria dos filmes de TiO_x 103
7.2.2 – Análise RBS dos filmes de TiO_x 105
7.3 – Caracterização dos filtros de interferência 115
7.3.1 – Espectrofotometria dos filtros de interferência 116
7.3.2 – Análise RBS dos filtros de interferência 119
7.3.3 – Caracterização funcional dos filtros de interferência 122

7.3.4 – Caracterização elétrica dos filtros de interferência 124
8 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 126
ANEXO I – Espectrofotometria 128
ANEXO II – Tabelas de índice de refração de todos os filmes de TiO_x fabricados 140
ANEXO III – Insucessos na obtenção dos filtros de interferência 166
A.3.1 – Espectrofotometria dos filtros de interferência 167
A.3.2 – Análise RBS dos filtros de interferência 175
A.3.3 – Impossibilidade de cancelamento total de uma das componentes de polarização 182
BIBLIOGRAFIA 187
APÊNDICE I – Receitas de implementação dos filtros de interferência em ordem cronológica I
APÊNDICE II – Absorção da luz em semicondutores VIII
Ap.2.1 – Coeficiente de absorção α VIII
Ap.2.2 – Absorção da luz em junções PN X
APÊNDICE III – Procedimento para o projeto dos filtros e listagens dos *m-files* XVII
Ap.3.1 – Resumo do formalismo matemático empregado nos toolbox Matlab™ XIX
APÊNDICE IV – Utilização do software SIMNRA® XXII

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1: *Sunfish* (acima) e sépia (abaixo). Exemplos de animais com sistema visual sensível ao estado de polarização da luz. 1
Fig. 2: Sistema PDI proposto por Tyo et al. (1996). "O" é o objeto visualizado, TNLC é um dispositivo utilizado para girar o eixo de polarização da luz. "A" é um analisador, filtro seletivo à polarização da luz. "F" é um filtro tipo *narrow-band*, necessário para restringir o comprimento de onda da luz à faixa onde os demais elementos operam. 3
Fig. 3: Sistemas propostos neste trabalho. Em a) caso discreto; em b) o caso integrado 5
Fig. 4: Estrutura cristalográfica em função de dimensões e ângulos. Átomos posicionados nos vértices do cubo. 8
Fig. 5: Possível estrutura colunar obtida por deposição física sob ângulo. A distribuição desigual de material e *voids* propicia a birrefringência de forma neste filme. O tamanho das colunas equivale à espessura do filme, ou seja, da ordem de alguns nanômetros a centenas de nanômetros. 10
Fig. 6: Obtenção da estrutura colunar em filmes finos como resultado na variação dos parâmetros de deposição. Em a) temos o diagrama SZM (Structure Zone Models) para filmes evaporados, e em b) o mesmo diagrama para filmes obtidos por *Sputtering*. Fonte: (Ohring, 2002). 12
Fig. 7: Diagrama esquemático de um equipamento *e-beam*. 13
Fig. 8: Estrutura colunar em um filme obtido por deposição em ângulo num *e-beam*. 14
Fig. 9: Deposição por *e-beam* em ângulo (ϕ). 15
Fig. 10: Relação entre o ângulo colunar e o ângulo de deposição para o TiO_2 (Hodgkinson et al, 1997). 15
Fig. 11: Índices de refração n_p e n_s para ZrO_2 (Hodgkinson et al, 1997). 16
Fig. 12: Índices de refração n_p e n_s para TaO_2 (Hodgkinson et al, 1997). 17
Fig. 13: Índices de refração n_p e n_s para TiO_2 (Hodgkinson et al, 1997). 17
Fig. 14: Propagação da luz em meios altamente dispersivos. *S*: sensor, *O*: objeto. 20
Fig. 15: Um sistema de aquisição de imagens sensível ao estado de polarização da luz. 22
Fig. 16: Objeto usado por Tyo et al. (1996) para testes, aqui vistos numa imagem de soma. 23
Fig. 17: Objeto visto pelo método proposto por Tyo et al. (1998). 25
Fig. 18: Representação Gráfica dos parâmetros HSB 26
Fig. 19: Variação da grandeza *Hue* 27
Fig. 20: Sistema proposto por Kalayjian et al. (1999). 28
Fig. 21: Circuito translinear. A corrente de saída, I_{pc}, é diretamente proporcional ao contraste de polarização da imagem. 29
Fig. 22: Decomposição do vetor campo elétrico em duas parcelas de polarizações ortogonais. 31
Fig. 23: Polarização da luz solar em interação com a atmosfera da Terra. 32

Fig. 24: Incidência de luz sobre metal. a) Campo elétrico paralelo (p); b) e perpendicular (s). 33
Fig. 25: Reflectância para a prata, o alumínio e o ouro. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997)....34
Fig. 26: Índice de polarização linear por reflexão. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997). 34
Fig. 27: Incidência da luz sobre um meio sem perdas. a) Campo elétrico paralelo (polarização p). b) perpendicular (polarização s). 35
Fig. 28: Reflectância para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al., (1997). 37
Fig. 29: Índice de polarização por reflexão para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997)....37
Fig. 30: Transmitância para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997). 38
Fig. 31: Índice de polarização por transmitância para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997). 38
Fig. 32: Representação esquemática de uma rede de difração polarizadora, usada apenas para indicar que ondas de polarização paralela ao eixo do polarizador são bloqueadas pelo mesmo. Λ deve ser da ordem de nanômetros para que a rede polarize a luz na região visível do espectro....39
Fig. 33: Razão de contraste de polarização em função do período da rede (BOMZON et al., 2001). 41
Fig. 34: Índice de refração complexo do alumínio em função do comprimento de onda. 45
Fig. 35: Índice de refração complexo da prata em função do comprimento de onda.45
Fig. 36: Parâmetros ópticos do alumínio (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função da espessura para $\lambda = 550$ nm. 46
Fig. 37: Parâmetros ópticos da prata (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função da espessura para $\lambda = 550$ nm. 46
Fig. 38: Parâmetros ópticos do alumínio (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função do comprimento de onda para $d = 20$ nm....47
Fig. 39: Parâmetros ópticos da prata (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função do comprimento de onda para $d = 20$ nm....47
Fig. 40: Índices de refração do TiO_2 em função do ângulo de deposição (Hodgkinson et al., 1997). 49
Fig. 41: Índices de refração n_p e n_s, para incidência normal, em função do ângulo de deposição. 49
Fig. 42: Processo de obtenção dos materiais P e S. 50
Fig. 43: Filtro Fabry-Perot (N = 2 e M = 1) com material birrefringente na cavidade. 52
Fig. 44: Filtro polarizador Fabry-Perot de dupla cavidade. 53
Fig. 45: Filtro Fabry-Perot com cavidade birrefringente. 54
Fig. 46: Filtro polarizador de banda estreita. 55
Fig. 47: Distribuição espectral da luz das principais fontes de iluminação (veja legenda). Fonte: página da internet. Endereço eletrônico http://www.atlaswsg.com/spd.html. 60
Fig. 48: Janela de absorção de luz para junções PN em silício. Veja Apêndice II.....60

Fig. 49: Filtro VA01_P. 63
Fig. 50: Filtro VA01_S. 63
Fig. 51: Filtro VE01_P. 64
Fig. 52: Filtro VE01_S. 64
Fig. 53: Filtro VH09_P. 65
Fig. 54: Filtro VH09_S. 65
Fig. 55: Filtro P refinado para valores de espessura de cavidade no range 160 – 165 nm. 67
Fig. 56: Filtro S refinado para valores de espessura de cavidade no range 160 – 165 nm. 67
Fig. 57: Simulação para filtro com transmitância máxima em 700 nm e k nulo ou de 0,022. 68
Fig. 58: Processo de deposição de TiO_x por *Sputtering* D.C. 70
Fig. 59: Vista transversal do equipamento de *Sputtering* empregado. Em detalhe um dos porta-amostras e o alvo. 71
Fig. 60: Ângulos de visada, em cada região do porta-amostras, em relação ao alvo de Ti, onde $\theta_1 = 21{,}0°$, $\theta_2 = 28{,}0°$ e $\theta_3 = 32{,}5°$. 72
Fig. 61: Distribuição das amostras analisadas no porta-amostras do *Sputtering*. 72
Fig. 62: Estrutura de um filtro Fabry-Perot de dupla cavidade ressonante. t_1 e t_2 são espessuras genéricas detalhadas nas tabelas de receitas. 75
Fig. 63: Rotação das lamínulas de vidro entre as deposições de TiO_x. ϕ é o ângulo de deposição. 76
Fig. 64: Janela do programa *Sunfish*. 81
Fig. 65: Janela do programa *SignusPro*. 82
Fig. 66: Montagem experimental empregada para obtenção de PDI´s. 83
Fig. 67: Primeiro teste: distinção entre materiais através da PDI. a) base escura, soma, b) base escura diferença, c) base transparente soma, d) base transparente diferença, e) base fosca soma e f) base fosca diferença. 84
Fig. 68: Reflexão da luz por superfície rugosa (fosca) a) e lisa (brilhante) b). 84
Fig. 69: Segundo teste: visualização da curvatura de um objeto usando PDI: (a) Imagem de diferença em tons de cinza; (b) imagem de diferença em pseudocores...85
Fig. 70: PDI em ambientes turvos. Primeira coluna: imagem de soma (convencional); segunda: PDI em tons de cinza; terceira: PDI em pseudocores. De cima para baixo: nenhuma colher de leite, até seis colheres na última linha. 88
Fig. 71: Montagem experimental com duas câmeras, C_1 e C_2. E é um semi-espelho posicionado a 45° com relação à trajetória da luz. O alvo é a esfera metálica já empregada nas experiências da seção anterior. 90
Fig. 72: Estrutura para o posicionamento da câmera e do polarizador. 90
Fig. 73: Detalhamento da figura 71. 91
Fig. 74: Esquema ilustrativo do funcionamento do sistema completo de obtenção de imagens de diferença de polarização utilizando a técnica de aquisição multiplexada. 92
Fig. 75: Janela principal do *software Polaris*. 92
Fig. 76: Opções de ajuste das imagens no *software Polaris* antes da obtenção das PDI e PSI. 93
Fig. 77: VC07 p_90° (vermelho) e s_90° (azul). Rank 1 104
Fig. 78: Espectros RBS, experimental e simulado, para substrato de vidro. 106
Fig. 79: Espectros RBS para amostras de espessura nominal de 180nm. 107

Fig. 80: Detalhe do pico de Ti relativo à figura 79. Repare como varia a espessura para a posição 01. 107
Fig. 81: Espectros RBS para amostras de espessura nominal de 150nm. 108
Fig. 82: Detalhe do pico de Ti, relativo à figura 81. 108
Fig. 83: Espectros RBS para amostras de espessura nominal de 170nm. 109
Fig. 84: Detalhe do pico de Ti relativo à figura 83. 109
Fig. 85: Espectros experimental e simulado para a amostra VE01 (espessura de 120nm nominal). 110
Fig. 86: Detalhe do pico de Ti relativo à figura 85. 110
Fig. 87: Correlação entre as medidas de espessura efetuadas por RBS e espectrofotometria. 113
Fig. 88: Estequiometria média em função do ângulo de deposição. 114
Fig. 89: Estequiometria em função da espessura do filme para amostras da posição 01. 115
Fig. 90: Espectro de filtro não-polarizador. 117
Fig. 91: Espectro de filtro polarizador. 117
Fig. 92: Sobreposição dos espectros de filtros polarizadores e não-polarizadores. . 118
Fig. 93: Espectro RBS para filtro não-polarizador. Posição 01. 120
Fig. 94: Espectro RBS para filtro polarizador. Posição 01. 120
Fig. 95: Espectro RBS para filtro polarizador mas a amostra foi posicionada fora da posição 01. 121
Fig. 96: Estequiometria x concentração planar, de ambas as cavidades, para filtros polarizadores e não-polarizadores. 121
Fig. 97: Montagem experimental empregada para determinar a resposta elétrica dos sensores sob a ação dos filtros implementados. 124
Fig. 98: Mudança de posicionamento do filtro para cada medida (pD ➔ p90). 125
Fig. 99: Montagem esquemática empregada para a análise dos espectros de transmitância. 128
Fig. 100: Espectro de transmitância de um filme qualquer. 130
Fig. 101: Espectro e envelope. Em verde, curva de transmitância máxima e em amarelo a mínima. 130
Fig. 102: Detalhe do espectro ilustrando o método de cálculo da parte real do índice de refração. 131
Fig. 103: Detalhe do espectro ilustrando o método para o cálculo da espessura do filme. 131
Fig. 104: Índice de refração em função do comprimento de onda para o vidro (substrato). 133
Fig. 105: Janela do programa iRefrac. 134
Fig. 106: Espectro original, amostra VB04_90. 135
Fig. 107: Espectro após 1 passagem do filtro. 135
Fig. 108: Espectro após 5 passagens do filtro. 136
Fig. 109: Espectro após 10 passagens do filtro. 136
Fig. 110: Espectro após 15 passagens do filtro. 137
Fig. 111: Determinação do envelope mostrando os pontos extremos como valores inicias. Em azul, próximo refinamento. 138
Fig. 112: VC07 p_90° (vermelho) e s_90° (azul). Rank 1. 161
Fig. 113: VA01 p (vermelho) e s (azul). Rank 3. 162
Fig. 114: VB01 p (vermelho) e s (azul). Rank 5. 162

Fig. 115: VB07 p (vermelho) e s (azul). Rank 8. 163
Fig. 116: VE01 sem polarização (vermelho) e girado de 90° (azul). Rank 2. 163
Fig. 117: VE13 sem polarização (vermelho) e girado de 90° (azul). Rank 6. 164
Fig. 118: VH07 p_90° (vermelho) e s_90° (azul). Rank 9. 164
Fig. 119: VH08 p (vermelho) e s (azul). Rank 7. 165
Fig. 120: VH09 p (vermelho) e s (azul). Rank 4. 165
Fig. 121: Comparativo entre os resultados conseguidos para cada receita (veja receitas no apêndice I). 167
Fig. 122: Estequiometria dos filmes das duas cavidades ressonantes para as receitas 02 e 08 (maior estequiometria: > 1,8) e 06 e 07 (estequiometria < 1,8). 169
Fig. 123: Características de birrefringência (capacidade de polarização) nos filtros implementados. 170
Fig. 124: Detalhe da figura 123. 171
Fig. 125: Comparação entre os filtros das receitas 02 e 08. 172
Fig. 126: Simulação para filtro com transmitância máxima em 699 nm e *k* nulo ou de 0,022. 173
Fig. 127: Primeira cavidade 102 nm, segunda 104 nm. Ts/Tp = 1,49. 174
Fig. 128: Primeira cavidade 102 nm, segunda 103 nm. Ts/Tp = 1,21. 174
Fig. 129: Espectro para receita 01, posição 01. 176
Fig. 130: Espectro para receita 02, posição 01. 176
Fig. 131: Espectro para receita 02, posições 04 e 10. 177
Fig. 132: Espectro para receita 02, posições 07. 177
Fig. 133: Espectro para receita 03. 178
Fig. 134: Espectro para receita 04. 178
Fig. 135: Espectro para receita 05. 179
Fig. 136: Espectro para receita 06. 179
Fig. 137: Espectro para receita 07. 180
Fig. 138: Espectro para receita 08. 180
Fig. 139: Espectro para receita PA. Filtro de uma cavidade e espessura menor. 181
Fig. 140: Espectro para receita PA. Filtro de uma cavidade. Amostra com rotação. 181
Fig. 141: Espectro para receita PA. Filtro de uma cavidade e espessura maior. 182
Fig. 142: Rotação das lamínulas de vidro entre as deposições de TiO_2. II
Fig. 143: Coeficiente de absorção para o Ge, Si e GaAs. IX
Fig. 144: Queda na intensidade da luz devida à absorção em semicondutores. IX
Fig. 145: Junção PN sob iluminação. XI
Fig. 146: *RE* para uma junção de $x_j = 0{,}3$ µm. XIV
Fig. 147: Janela de absorção para uma junção PN em silício para dois valores de *W*. XV
Fig. 148: Janela de absorção para junção PN em Si para dois valores de x_j. XVI
Fig. 149: Parâmetros da análises RBS utilizados no SIMNRA® XXII
Fig. 150: Dados para a simulação de um filtro de interferência sobre vidro. Ao fundo, espectros simulado e experimental. XXIII
Fig. 151: Parâmetros para a simulação do espectro RBS. XXIV

LISTA DE TABELAS

Tab. 1: Classificação óptica dos cristais conforme figura 4 (Hodgkinson et al., 1997). 9
Tab. 2: Comparativo do grau de polarização para diferentes materiais. Tabela gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido em (Hodgkinson et al, 1997)....36
Tab. 3: Comparação entre os diferentes tipos de filtros polarizadores....57
Tab. 4: Estrutura dos filtros simulados. 58
Tab. 5: Características dos filtros projetados para filmes específicos de TiO_x. Os índices de refração foram levantados experimentalmente neste trabalho (capítulo 7). *BP* é a faixa de passagem do filtro e *RC* é a rejeição à componente de polarização ortogonal. 62
Tab. 6: Características refinadas do filtro de interferência. 66
Tab. 7: Condições de deposição para as amostras processadas. 73
Tab. 8: Condições experimentais para o terceiro teste: visibilidade em ambientes turvos....86
Tab. 9: Alvo de alumínio. Condição: aquário sem água....95
Tab. 10: Alvo de alumínio. Condição: aquário com água. 95
Tab. 11: Alvo de alumínio. Condição: água com 0,8 g (1 colher) de leite de magnésia (LM)....96
Tab. 12: Alvo de alumínio. Condição: água com 1,6g (2 colheres) de LM....96
Tab. 13: Alvo de alumínio. Condição: água com 2,4 g (3 colheres) de LM. A iluminação é feita apenas por uma luminária....97
Tab. 14: Mesmo caso da tabela anterior, agora com iluminação ambiente além da luminária. 97
Tab. 15: Alvo de alumínio. Condição: água com 3,2 g (4 colheres) de LM. A iluminação é feita apenas por uma luminária....98
Tab. 16: Mesmo caso da tabela anterior, agora com iluminação ambiente além da luminária. 98
Tab. 17: Alvo de plástico. Condição: aquário sem água....99
Tab. 18: Alvo de plástico. Condição: aquário com água. 99
Tab. 19: Alvo de plástico. Condição: água com 0,8g (1 colher) de leite de magnésia (LM)....100
Tab. 20: Alvo de plástico. Condição: água com 1,6g (2 colheres) de LM. 100
Tab. 21: Alvo de plástico. Condição: água com 2,4g (3 colheres) de LM. A iluminação é feita apenas por uma luminária....101
Tab. 22: Mesmo caso da tabela anterior, agora com iluminação ambiente além da luminária. 101
Tab. 23: Resultados dos filmes que apresentaram maiores diferenças de índice de refração....104
Tab. 24: Composição estequiométrica do substrato de vidro....106
Tab. 25: Dados resultantes das análises por RBS e espectrofotometria. 111
Tab. 26: Correlação entre as espessuras dos filmes de TiO_x obtidas por RBS e espectrofotometria. 112
Tab. 27: Estequiometria das amostras em função do ângulo de deposição. 114

Tab. 28: Parâmetros do filtro polarizador. RC é a rejeição à componente ortogonal em relação ao tipo do filtro. 118
Tab. 29: Caracterização funcional dos filtros implementados. As dimensões do substrato onde foi implementado o filtro são de 24 x 24 mm. 123
Tab. 30: Resultados da caracterização elétrico de uma célula solar associada aos filtros implementados. A tensão em vazio refere-se à medida sem o filtro. 126
Tab. 31: Resultados das análises dos filmes de TiO_2. 140
Tab. 32: Valores de diferença de índice de refração. Em destaque os maiores valores. 149
Tab. 33: Resultados dos filmes que apresentaram maiores diferenças de índice de refração. 161
Tab. 34: Coeficientes de absorção para o Si (Jellison et al, 1982). X

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	...	Alumínio(III) Acetilacetonato
BP	...	Faixa de passagem, tomada à meia altura do pico
BR	...	Faixa de rejeição, definida como o intervalo, em comprimento de onda, entre regiões de alta transmitância. Tomada à meia altura do pico
CCD	...	Charge-Coupled Device
DCP	...	Diodo Controlado por Porta
DLV	...	Decapante Lento de Vidro (solução para remoção de SiO_2: 1HF (49%): $6NH_4F$ (49%))
HSB	...	Hue, Saturation, Brightness (parâmetros de definição de cores)
LPD	...	Liquid Phase Deposition
MOS	...	Metal Oxide Semiconductor
NIR	...	Near InfraRed (infravermelho próximo – região do espectro EM)
PDI	...	Polarization-Difference Image (imagem de diferença de polarização)
PDS	...	Polarization-Sum Image (imagem "cega" à polarização da luz)
RBS	...	Rutherford Back-Scattering
RGB	...	Red, Green, Blue (parâmetros de definição de cores)
RTO	...	Rapid Thermal Oxidation
RTP	...	Rapid Thermal Processing
SEM	...	Scaning Electron Microscopy
SPD	...	Spray Pyrolysis Deposition
TNLC	...	Twisted Nematic Liquid Crystal (dispositivo usado para rotacionar o eixo de polarização da luz)
TOA	...	Titânio(IV)oxi acetilacetonato

UV	...	UltraVioleta (região do espectro eletromagnético)
VIS	...	Visível (região do espectro eletromagnético)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	...	Absorbância
a	...	Indica que o meio de incidência é o ar
a, b, c	...	Distâncias entre átomos na rede cristalina
$\vec{B}$	...	Vetor indução magnética
C	...	Camada espaçadora de ¼ de comprimento de onda
C	...	Nível de intensidade máxima suportada pelo monitor
c	...	Velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8$ m/s)
$\vec{D}$	...	Vetor deslocamento elétrico
D_n	...	Coeficiente de difusão para elétrons
D_p	...	Coeficiente de difusão para lacunas
d	...	Espessura de filmes finos
$\mathcal{E}$	...	Amplitude de campo elétrico
E	...	Energia
E_G	...	Largura em energia da faixa proibida de um semicondutor (*gap*)
E_P	...	Energia do fônon
$\vec{E}$	...	Vetor campo elétrico
F	...	Fluxo de fótons incidentes
G	...	Taxa de geração (de portadores)
G_n	...	Taxa de geração para elétrons
G_p	...	Taxa de geração para lacunas
g	...	Indica que o substrato é de vidro (*glass*)

H_{max}	...	Amplitude de campo magnético
H	...	Camada de índice de refração alto e espessura igual a ¼ de comprimento de onda
d_L	...	Espessura da lâmina de silício
$\vec{H}$	...	Vetor campo magnético
H'	...	Espessura da lâmina de silício a partir do fim da região de depleção
I	...	Imagem (mapa da intensidade dos *pixels*)
$\bar{I}$	...	Imagem média de uma seqüência temporal
I_D	...	Intensidade dos *pixels* obtidos por diferença (imagem de diferença)
I_D^T	...	Imagem de diferença após transformação
I_P	...	Intensidade de *pixel* obtida para polarização *p*
IPL^R	...	Índice de polarização linear por reflexão
IPL^T	...	Índice de polarização linear por transmissão
I_S	...	Intensidade de *pixel* obtida para polarização *s*
I_S	...	Intensidade dos *pixels* obtidos por soma (imagem de soma)
I_S^T	...	Imagem de soma após transformação
i	...	Unidade imaginária
$\tilde{i}$	...	Componente aleatória numa imagem (intensidade de *pixels*)
$\vec{J}$	...	Vetor densidade de corrente
J_{base}	...	Densidade de corrente para região quase-neutra de base
J_{dp}	...	Densidade de corrente para região de depleção
J_n	...	Densidade de corrente para elétrons
J_p	...	Densidade de corrente para lacunas
J_{sup}	...	Densidade de corrente para região quase-neutra de superfície

J_T	...	Densidade de corrente total
k	...	Índice de refração (parte imaginária) = Índice de absorção
$\vec{k}$	...	Versor na direção de propagação. Número de onda
L	...	Camada de índice de refração baixo e espessura igual a ¼ de comprimento de onda
L_n	...	Comprimento de difusão para elétrons
L_p	...	Comprimento de difusão para lacunas
L_{pixel}	...	Largura de *pixel*
n	...	Índice de refração (parte real)
n_i	...	Índice de refração do meio de incidência da onda
n_p	...	Índice de refração "visto" por uma onda sob polarização *p*
N_P	...	Número de elétrons no lado P
N_S	...	Concentração de substrato
n_S	...	Índice de refração do substrato
n_s	...	Índice de refração "visto" por uma onda sob polarização *s*
P	...	Camada de índice de refração birrefringente tipo *p*. ¼ de comprimento de onda
p	...	Eixo de polarização paralelo ao plano de incidência
$\vec{P}$	...	Vetor polarização
p_n	...	Número de lacunas no lado N da junção
q	...	Carga do elétron
R	...	Reflectância
RC	...	Rejeição à componente ortogonal em relação ao tipo de filtro
RCs	...	Rejeição à componente *s*
RE	...	Rendimento espectral

R_P	...	Coeficiente de reflectância para polarização *p*
R_S	...	Coeficiente de reflectância para polarização *s*
S	...	Camada de índice de refração birrefringente tipo *s*. ¼ de comprimento de onda
S_p	...	Velocidade de recombinação para lacunas
s	...	Eixo de polarização perpendicular ao plano de incidência
T	...	Transmitância
T_{amb}	...	Temperatura ambiente
T_{oper}	...	Temperatura de operação
TM0	...	Transmitância máxima para um dado comprimento de onda (envoltória)
Tm0	...	Transmitância mínima para um dado comprimento de onda (envoltória)
T_P	...	Coeficiente de transmitância associado à luz sob polarização *p*
T_{pico}	...	Transmitância de pico
T_S	...	Coeficiente de transmitância associado à luz sob polarização *s*
t	...	Variável tempo
W	...	Largura da região de depleção
x	...	Direção perpendicular à superfície do filme ou lâmina
x_j	...	Profundidade de junção
y	...	Direção paralela à superfície do filme ou lâmina
z	...	Direção paralela à superfície do filme ou lâmina
1, 2, 3	...	Eixos de coordenadas principais para um material
α	...	Coeficiente de absorção
α, β, γ	...	Ângulos formados pelos eixos da estrutura cristalográfica
γ_P	...	Fator de ajuste para imagem de diferença

γ_S	...	Fator de ajuste para imagem de soma
Δn	...	Diferença de índices de refração
ε	...	Permissividade elétrica
θ	...	Ângulo de incidência de um raio luminoso propagando-se de um meio para outro
λ	...	Comprimento de onda
λ	...	Unidade de projeto de máscaras (metade da menor largura de canal)
μ	...	Permeabilidade magnética
ν	...	Freqüência
ξ	...	Constante de propagação
ρ	...	Densidade de cargas
σ	...	Condutividade
τ_n	...	Tempo de vida médio para elétrons
τ_p	...	Tempo de vida médio para lacunas
ϕ_0	...	Eixo de orientação do analisador
ϕ_B	...	Potencial de barreira numa junção PN
φ	...	Ângulo de deposição
ψ	...	Ângulo formado pelas colunas do material
ω	...	Velocidade angular

1 – INTRODUÇÃO

A motivação para este projeto surgiu a partir do trabalho de alguns pesquisadores da Universidade da Pennsylvania sobre as propriedades de imagens do estado de polarização da luz. A idéia veio do estudo do sistema visual de certos peixes de águas rasas (*sunfish*) que se utilizam das propriedades das imagens de diferença de polarização, como o aumento do contraste em ambientes turvos, em suas atividades predatórias (Rowe et al., 1995); (Rowe et al., 1996). Por outro lado, recentemente, Nadav et al. (1999) demonstraram que a sépia, um cefalópode, também possui um sistema visual sensível ao estado de polarização da luz).

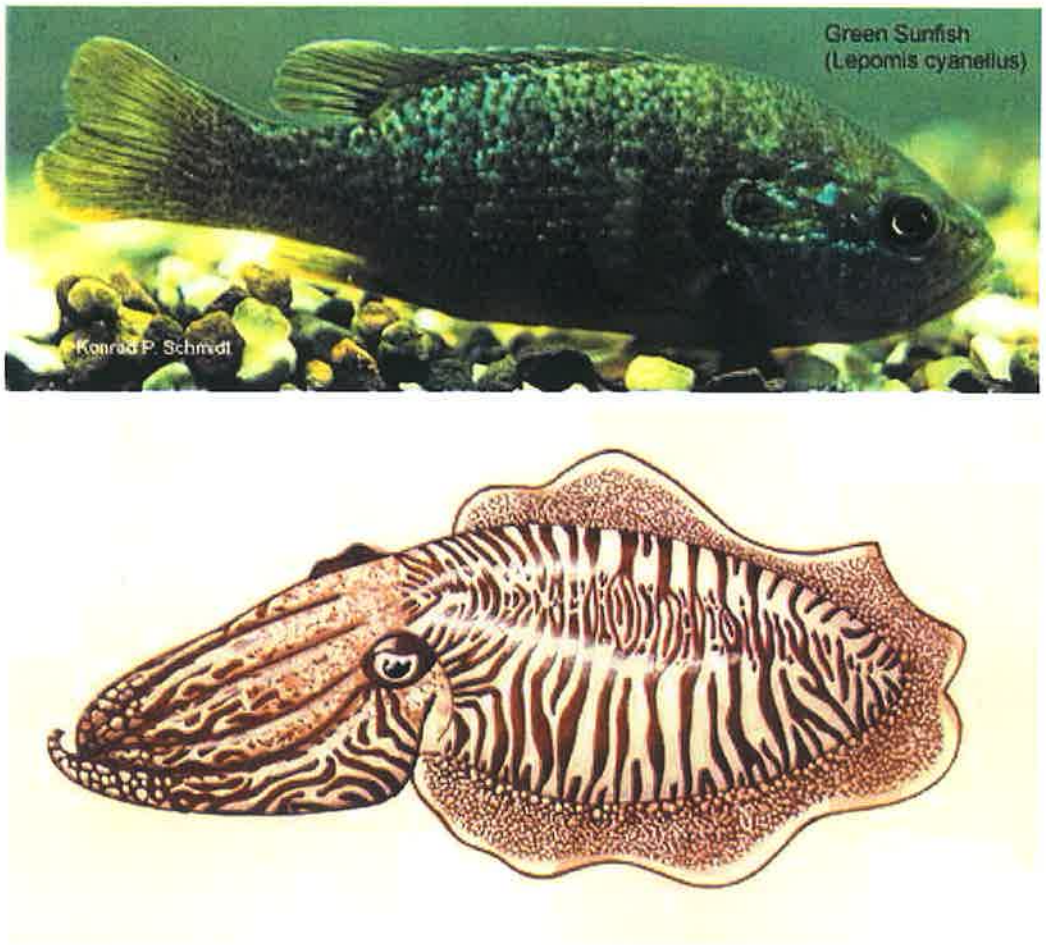


Fig. 1: *Sunfish* (acima) e sépia (abaixo). Exemplos de animais com sistema visual sensível ao estado de polarização da luz.

Nesses organismos, a presença desta característica, ou seja, sensibilidade ao estado de polarização da luz, leva a vantagens nas atividades predatórias, pois o aumento de contraste em ambientes turvos facilita a visualização de potenciais presas.

De fato, no ambiente aquático, existem pelo menos duas formas de camuflagem, quando o peixe é visto contra um fundo d'água (Nadav et al., 1999): a primeira é a transparência e a segunda é o ajuste na sua reflectância de forma a diminuir áreas de sombra sobre o seu corpo e fazendo com que o mesmo apresente um nível de brilho semelhante ao fundo contra o qual é visto.

Acontece que a luz, refletida ou transmitida, acaba por apresentar um certo nível de polarização linear (ao longo de todo este trabalho, sempre que for utilizada a palavra "polarização", estaremos nos referindo à polarização linear) como será mais bem explicado na secção 3.5 do capítulo 3.

No caso da sépia, a sensibilidade ao estado de polarização da luz advém da distribuição ortogonal de microvilosidades em foto-receptores vizinhos sobre a sua retina (Nadav et al., 1999). Para o *sunfish*, a mesma é função de uma variação do índice de refração nos segmentos internos das células-cone da retina. Tal variação é função, por sua vez, da distribuição de mitocôndrias, o que afeta a densidade local do citoplasma (Rowe et al., 1996).

Portanto, uma primeira aplicação para imagens assim geradas seria justamente aquele já desenvolvido pela natureza: a melhoria das condições de visibilidade mesmo em ambientes dispersivos (Tyo et al., 1996); (Tyo et al., 1998). Estudos posteriores (Wolff (1997) faz um apanhado geral, por exemplo) mostraram que a utilização de imagens de diferença de polarização da luz pode encontrar aplicações as mais diversas como, por exemplo, no estudo de campos magnéticos em galáxias distantes (Magalhães, 1995); (Magalhães, 1996); (Laura et al., 1999), em estudos climatológicos através das propriedades de aerossóis quando vistos do espaço (Masuda et al., 2000) e até no aumento de contraste em tecidos biológicos alterados por moléstias ou deficiências (Ushenko, 2001); (Burkovets et al., 2002).

Ainda outra possibilidade é a utilização da "assinatura de polarização", ou seja, o modo como uma superfície produz luz polarizada ou introduz níveis de polarização na luz refletida, para aplicações que vão desde a diferenciação entre

regiões polarizadoras daquelas que não o são, até a determinação da curvatura dessas superfícies baseado no fato de o nível de polarização variar conforme o ângulo de visada.

A motivação para o emprego deste tipo de aquisição de imagens torna-se, pois, evidente, dadas as suas potenciais aplicações, algumas já exploradas como a polarimetria em astrofísica (Magalhães et al., 1995); (Magalhães et al.,1996); (Laura et al., 1999) e outras ainda por serem descobertas, levando-se em consideração não somente aplicações na região visível do espectro, mas também no infravermelho ou mesmo no ultravioleta, o que poderiam trazer resultados interessantes no campo do sensoreamento remoto aplicado à agricultura. Por todas essas características, o uso de PDI's pode ser também empregado em sistemas de fusão de imagens, acrescentando-se assim, o estado de polarização, ou a assinatura de polarização de uma superfície, às informações extraídas por esses sistemas, o que ampliaria grandemente nosso conhecimento sobre um objeto analisado.

Várias configurações são possíveis no estudo de imagens do estado de polarização da luz, desde uma imagem representando a direção do vetor de polarização local, até aquelas obtidas através da diferença de intensidade entre duas imagens tomadas para estados ortogonais de polarização, tudo dependendo da particular aplicação a ser desenvolvida e da disponibilidade de aparelhos e equipamentos.

O estudo dos pesquisadores da Pennsylvania levou-os a proporem um sistema que gerasse imagens de diferença de polarização (PDI: *Polarization-difference imaging*) conforme apresentado por Tyo et al. (1996) e ilustrado na figura 2.

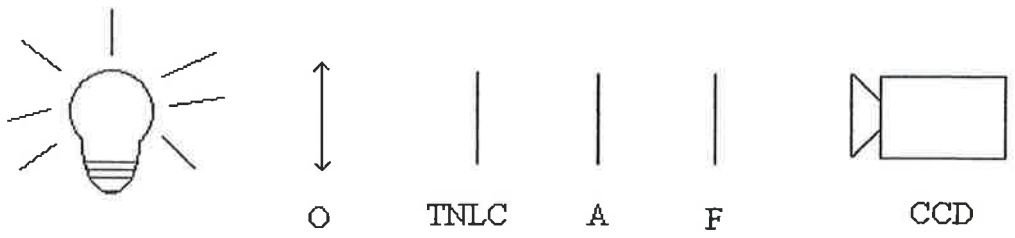


Fig. 2: Sistema PDI proposto por Tyo et al. (1996). "O" é o objeto visualizado, TNLC é um dispositivo utilizado para girar o eixo de polarização da luz. "A" é um analisador, filtro seletivo à polarização da luz. "F" é um filtro tipo *narrow-band*, necessário para restringir o comprimento de onda da luz à faixa onde os demais elementos operam.

A PDI é o resultado do processamento (subtração *pixel* a *pixel*) de duas imagens de um dado objeto tomadas para polarizações ortogonais, conforme representado através da equação 1-2 (a imagem de soma, eq. 1-1, é simplesmente uma imagem "cega" à polarização da luz, uma imagem convencional).

$$I_S(x,y) = I_p(x,y) + I_s(x,y) \tag{1-1}$$

$$I_D(x,y) = I_p(x,y) - I_s(x,y) \tag{1-2}$$

Por não ser este um sistema de tempo real, surgem alguns problemas como, por exemplo, a possibilidade de a imagem variar durante o período de amostragem. Isso faria com que a subtração das imagens não fosse feita sempre para um mesmo *pixel* e a conseqüente diferença não seria devida unicamente à diferença nos níveis de polarização.

1.1 – Propostas e justificativas

Neste trabalho, propomos duas montagens alternativas àquela apresentada na figura 2. A primeira (figura 3-a), através do uso redundante de dois filtros e dois sistemas de visão (câmeras), possibilita ao sistema a operação em tempo real, e a segunda (figura 3-b), empregando dois diodos com filtros *p* e *s* acoplados, funciona como um sensor discreto para um *pixel*, também com operação em tempo real. Essa implementação também poderia ser, posteriormente, desenvolvida na forma de circuito integrado.

Na figura 3-a, as câmeras empregadas podem ser de qualquer tipo, quer CCD quer CMOS, ou mesmo outras que vierem a aparecer no mercado, e os filtros também podem ser filtros polarizadores convencionais. Neste sistema, cada *pixel* é mapeado duplamente para cada câmera através do semi-espelho e a subtração das imagens ocorre em tempo real.

Já para o sistema integrado, ilustrado em 3-b, os *pixels* mapeados não são exatamente coincidentes, mas se os sensores forem bastante pequenos (o que é verdade para um sistema completamente implementado em Si com as tecnologias hoje disponíveis) esse pequeno desalinhamento não será relevante, principalmente

face à grande vantagem oferecida por um sistema de tempo real que possa gerar PDI's e ainda do mesmo tamanho e portabilidade de uma câmera convencional (Wolff, 1997); (Kalayjian et al., 1999).

Hoje em dia já está bastante desenvolvida a tecnologia de câmeras CMOS completamente integradas (Smith et al., 1998), baseadas em tecnologia de *pixel* ativo CMOS (Fossum, 1997); (Sunetra et al., 1997) ou mesmo fotodetectores em Si (ÜNLÜ et al., 2004).

Também já foi reportado (Correia et al., 2000) o uso de micro--espectrômetros, baseados em filtros Fabry-Perot, para a filtragem em comprimento de onda da luz que atinge os sensores ópticos, fotodiodos no caso da referência aqui indicada.

Até sistemas capazes de gerar PDI's já foram construídos em forma integrada (Kalayjian, 1999). No capítulo 3 mostraremos em detalhe o trabalho de Kalayjian (1999).

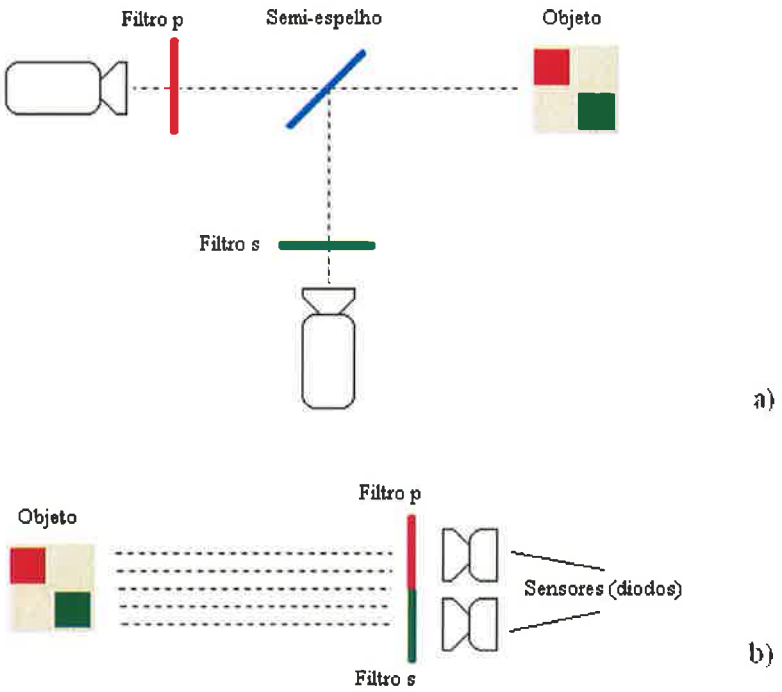


Fig. 3: Sistemas propostos neste trabalho. Em a) caso discreto; em b) o caso integrado.

Apesar das importantes modificações introduzidas em 3-a, uma das propostas deste trabalho é adquirir as condições técnicas necessárias para fabricar o sistema ilustrado em 3-b. Para isso, traçamos o objetivo de obter filtros polarizadores compatíveis com os processos de obtenção de filmes finos já largamente empregados na indústria de microeletrônica em Si.

Para a implementação desses filtros, empregamos a configuração clássica do interferômetro de Fabry-Perot (Vaughan, 1989) atuando como um filtro passa-faixa (outras aplicações para interferômetros de Fabry-Perot são reportadas por Calaza et al. (2004), Tenev et al. (2004) e Kim et al. (2004), este último aborda ainda o problema da compensação da polarização da luz), onde o material de cavidade (dupla cavidade ressonante no presente trabalho) foi substituído por filmes birrefringentes de forma a introduzir uma assimetria de comportamento em função do estado de polarização da luz. A teoria a respeito disto será melhor apresentada e desenvolvida no capítulo 3.

É importante destacar que conseguimos associar o uso de micro-espectrômetros, de forma similar àquela reportada por Correia et al. (2000), com filtros polarizadores obtidos a partir de filmes birrefringentes de TiO_x. Tal associação de tecnologias ainda não foi reportada na literatura e constitui a base para futuros aperfeiçoamentos que poderão levar à implementação de um microssistema integrado de aquisição de imagens sensível ao estado de polarização da luz completamente baseado em tecnologias compatíveis com os processos CMOS vigentes hoje em dia, sendo essa a sua principal vantagem em relação ao sistema proposto por Kalayjian et al. (1999).

Outro aspecto estudado foi o da metodologia de obtenção de filmes birrefringentes, corpo central deste trabalho, e como a birrefringência está associada aos parâmetros do processo de deposição.

1.2 – Objetivos

São objetivos para esse trabalho:

a) Implementação de um sistema empregando duas câmeras CCD e filtros polarizadores para a obtenção de imagens de diferença de polarização em tempo real;
b) Obtenção e caracterização de filmes finos birrefringentes de TiO_x;
c) Simulação e implementação de filtros de interferência, polarizadores ou não, compatíveis com tecnologia CMOS utilizando-se a estrutura Fabry-Perot associada a filmes birrefringentes de TiO_x.

1.3 – Organização da tese

O presente texto é composto por oito capítulos distribuídos da seguinte forma: no primeiro capítulo foi apresentada a introdução do trabalho ressaltando-se justificativas e discorrendo sobre a natureza do trabalho, também sendo apresentados os objetivos do mesmo.

O segundo capítulo aborda o fenômeno da birrefringência, tanto a natural quanto a que se convencionou chamar de "birrefringência de forma" (Hodgkinson et al., 1997), resultado do processo de deposição de filmes finos.

Os sistemas de aquisição de imagens do estado de polarização da luz, bem como equacionamentos e características das PDI's (*polarization-difference images*) são apresentados no capítulo 3, bem como um exemplo prático, já reportado na literatura, de um sistema real com essas propriedades.

O capítulo 4 traz nossas simulações de filtros de interferência polarizadores, necessários para o projeto dos filtros reais, apresentado no capítulo 5.

Os procedimentos experimentais empregados na obtenção de filmes finos de TiO_x e construção de filtros polarizadores são reportados no capítulo 6, ao passo que os resultados de caracterizações e também discussões são apresentados no sétimo capítulo. Na seqüência, as conclusões e perspectivas futuras deste trabalho são resumidas no oitavo capítulo.

Ao final é apresentada a bibliografia consultada e também alguns anexos e apêndices acrescentados com a finalidade de esclarecer algum pormenor ou demonstrar algumas metodologias, principalmente no caso das simulações.

2 – BIRREFRINGÊNCIA

Birrefringência é o fenômeno no qual um feixe de luz, ao se deslocar ao longo de um dado material, apresenta índices de refração distintos dependendo da direção de propagação. A razão física para esse fenômeno é a dificuldade que os elétrons do material encontram em se ajustar ao campo elétrico variável ao qual estão expostos, dificuldade essa que varia com a direção devido a assimetrias na estrutura cristalográfica do material. O nome advém do fato de que existem no material dois eixos para os quais a velocidade de deslocamento da luz não depende da sua polarização.

A tabela 1 sumariza as propriedades ópticas de alguns tipos de cristais de acordo com os parâmetros detalhados na figura 4. Considerando um dado material cristalino, podemos definir três eixos principais que apresentarão três índices de refração, n_1, n_2 e n_3, indicados na tabela 1. Tais eixos ficariam assim definidos: o eixo 1 perpendicular ao plano ab, o eixo 2 é perpendicular ao plano de bc, e o eixo 3 é perpendicular ao plano ac.

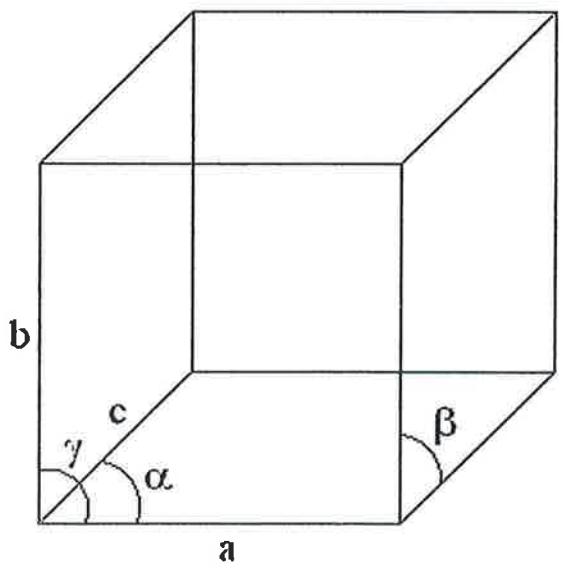


Fig. 4: Estrutura cristalográfica em função de dimensões e ângulos. Átomos posicionados nos vértices do cubo.

Na figura 4 acima, a, b e c representam as distâncias entre os átomos que compõem a estrutura do cristal, enquanto que α, β e γ são os ângulos de inclinação para cada aresta, conforme representado.

Da tabela 1, vemos que somente cristais cúbicos são isotrópicos (pois a velocidade de propagação da luz não depende da direção) e que dos demais, os cristais que são biaxiais (ortorrômbicos, monoclínicos e triclínicos) apresentam birrefringência (dois eixos ópticos).

Tab. 1: Classificação óptica dos cristais conforme figura 4 (Hodgkinson et al., 1997).

Sistema cristalográfico	Distâncias	Ângulos	Índices principais	Classificação óptica
Cúbico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	$n_1 = n_2 = n_3$	Isotrópico
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90°$ $\gamma = 120°$	$n_1 \neq n_2 = n_3$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	$n_1 \neq n_2 = n_3$	Uniaxial
Trigonal	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma$ $< 120°, \neq 90°$	$n_1 \neq n_2 = n_3$	
Ortorrômbico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	$n_1 \neq n_2 \neq n_3$	
Monoclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	$n_1 \neq n_2 \neq n_3$	Biaxial
Triclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$	$n_1 \neq n_2 \neq n_3$	

Isso implica em que o fenômeno da birrefringência depende da estrutura cristalográfica dos materiais, pois parâmetros diferentes entre os átomos do cristal em determinadas direções faz com que a velocidade de propagação da luz no material seja dependente da direção pela qual ela se propaga. Tal efeito pode ser induzido artificialmente, como veremos na secção 2.1 a seguir.

2.1 – Birrefringência de forma

Como ficou demonstrado por Hodgkinson et al. (1997), qualquer filme dielétrico depositado em ângulo pode apresentar o que se convencionou chamar de

"birrefringência de forma" (veja também Yi et al. (2004)), sendo obtida artificialmente através do controle da inclinação da estrutura de colunas a partir dos parâmetros do particular processo de deposição. Uma estrutura colunar inclinada implica em ter material depositado preferencialmente numa direção em detrimento de outras, sendo que o espaço entre colunas apresenta vazios, ou *voids*. Assim, a composição, em quantidades diferenciadas de material e *voids* resulta num índice de refração macroscópico dependente da direção de propagação da luz no filme.

Um material assim obtido apresenta propriedades ópticas semelhantes às apresentadas por um sistema cristalográfico tipo ortorrômbico (tab. 1), e portanto, birrefringência biaxial.

A figura 5 ilustra uma possível estrutura colunar cristalográfica obtida num processo de deposição.

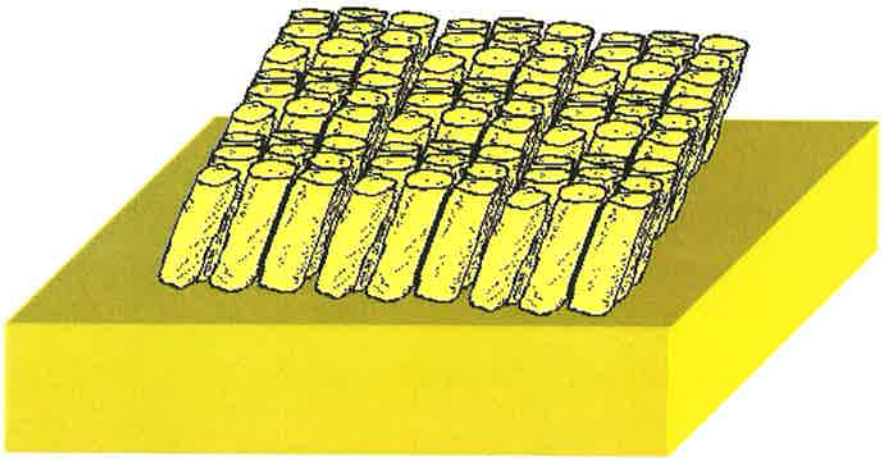


Fig. 5: Possível estrutura colunar obtida por deposição física sob ângulo. A distribuição desigual de material e *voids* propicia a birrefringência de forma neste filme. O tamanho das colunas equivale à espessura do filme, ou seja, da ordem de alguns nanômetros a centenas de nanômetros.

Assim, variando-se o ângulo sob o qual depositamos o material, (por exemplo um metal, como o titânio, em atmosfera residual de oxigênio), podemos obter um dielétrico que apresente birrefringência de forma.

A secção 2.3 apresenta as simulações ópticas realizadas para um tal material e demonstra que o mesmo é adequado para se fabricar filtros polarizadores.

2.2 – Estrutura colunar em filmes finos

A propriedade de birrefringência de forma, como vimos, surge a partir das características dos filmes depositados, em particular do fato de os mesmos poderem apresentar estrutura colunar.

Em última análise, isso se deve ao fato de o filme acabar tendo regiões espacialmente não-uniformes compostas por um material (colunas) com um dado índice de refração intercaladas por vazios que apresentam índice de refração distinto. Dada a inclinação dessas colunas, a luz que se propaga em diferentes direções neste material acabará por experimentar índices de refração diferentes, o que caracteriza o comportamento birrefringente.

Na figura 6 é apresentado o diagrama SZM (*Structure Zone Models*) para obtenção de dois tipos de filmes, evaporado e depositado por *Sputtering*.

Um diagrama SZM, primeiramente proposto por Movchan e Demchishin, relaciona as condições de deposição, como pressão e temperatura de substrato para a evaporação, e a tensão de polarização e temperatura de substrato para o caso da deposição por *Sputtering*, com as características morfológicas dos filmes formados.

Como vemos na figura 6, são distinguíveis 4 regiões, ou zonas, morfologicamente distintas nos filmes depositados.

A zona 1, formada a baixas temperaturas de substrato (inferiores a 0,3 vezes a temperatura de fusão do filme) apresenta as características que temos como fundamentais para esse trabalho, pois é nessas condições que são formadas as estruturas colunares.

Em seqüência vemos uma região de transição, T, seguida pelas regiões 2 e 3, caracterizadas por grãos cada vez maiores, resultando em filmes mais densos e apresentando comportamentos mais próximos aos esperados para um material de *bulk*.

Vemos assim, que o controle das condições de deposição podem levar os filmes obtidos a apresentarem a estrutura colunar necessária para se obter os efeitos de birrefringência de forma requeridos para as aplicações em polarização deste trabalho.

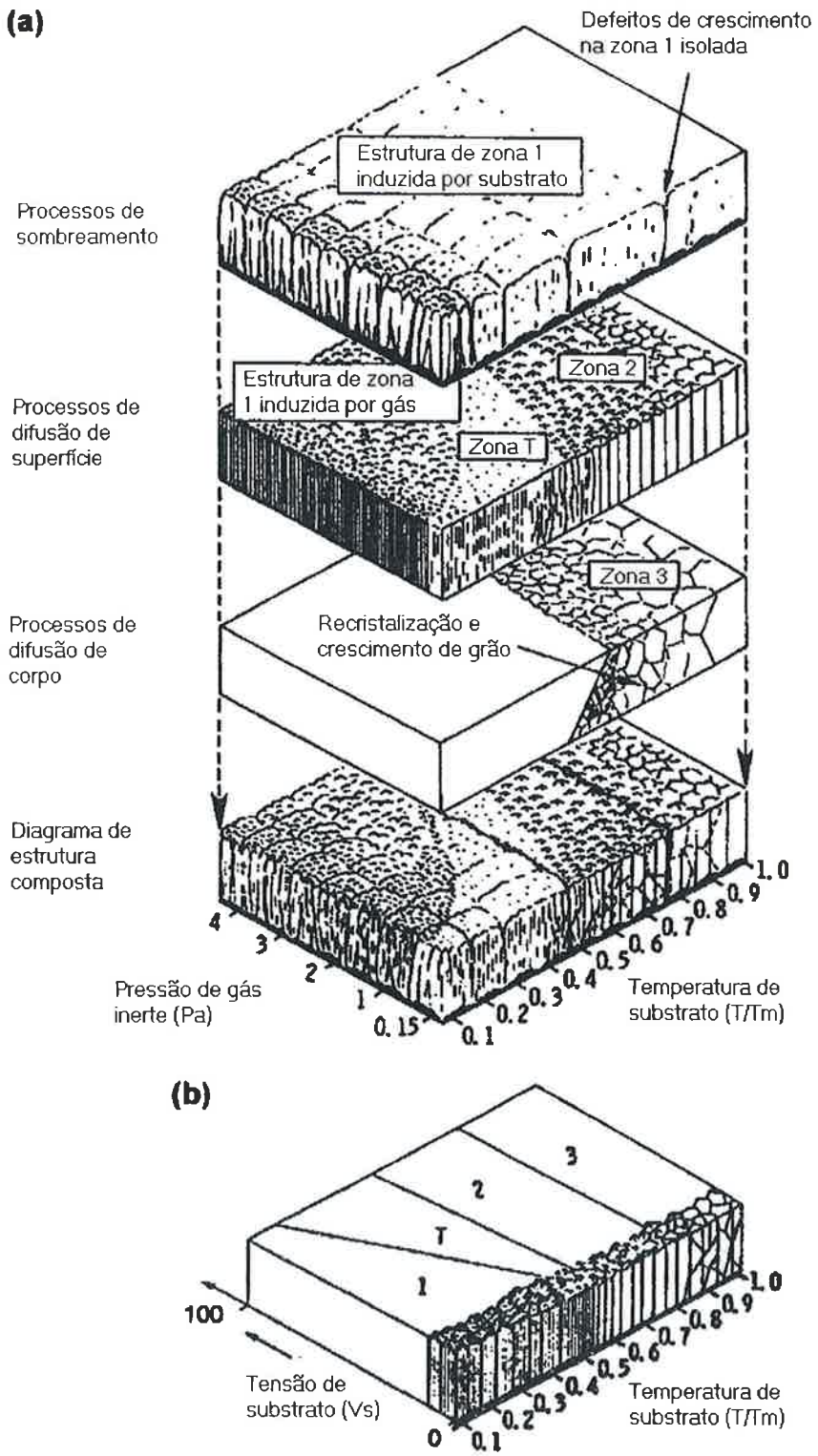


Fig. 6: Obtenção da estrutura colunar em filmes finos como resultado na variação dos parâmetros de deposição. Em a) temos o diagrama SZM (Structure Zone Models) para filmes evaporados, e em b) o mesmo diagrama para filmes obtidos por *Sputtering*. Fonte: (Ohring, 2002).

2.3 – Obtenção de materiais birrefringentes por e-beam

As secções anteriores abordaram a birrefringência de forma associada à estrutura colunar inclinada em filmes finos depositados. Uma técnica que permite esse tipo de estrutura é a efetuada por *electron-beam* (*e-beam*). Apesar de outras técnicas de deposição física também permitirem o mesmo resultado (veja por exemplo Jiang et al. (2004)), a deposição por *Sputtering* será melhor explorada ao longo deste trabalho pois é a que será aqui utilizada.

Na figura 7 vemos um diagrama esquemático do funcionamento de uma câmara de deposição por *e-beam*.

Nesta mesma figura 7 podemos verificar que o substrato pode ser posicionado de forma a apresentar um ângulo de deposição com relação à normal ao alvo a ser vaporizado. Dependendo da presença de gases residuais na câmara de deposição, o material depositado pode ser resultado da reação do material do alvo com a atmosfera residual, possibilitando a deposição de vários tipos de dielétricos com birrefringência de forma.

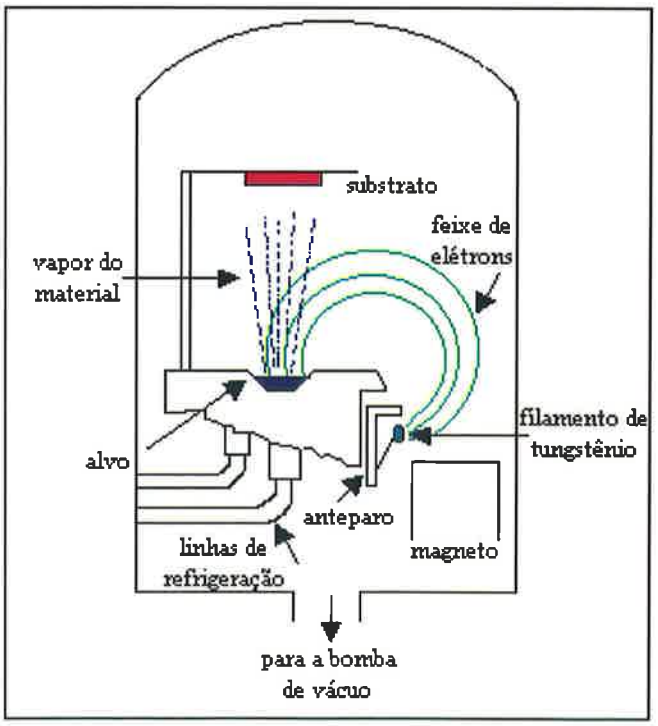


Fig. 7: Diagrama esquemático de um equipamento *e-beam*.

Esse diagrama em particular possui mais de um canhão de elétrons para a evaporação de materiais. Um aparelho assim permite a deposição de mais de um material ao mesmo tempo, podendo-se até depositar diversos tipos de estequiometria.

Se preservarmos uma atmosfera residual, por exemplo de oxigênio, é possível a obtenção de óxidos de quantos metais estiverem disponíveis nos alvos.

Esse aparelho pode permitir ainda o posicionamento angular da amostra no porta-amostra e com isso pode-se obter material depositado com uma micro-estrutura no formato de colunas inclinadas, como é mostrado na figura 8.

Para um filme assim obtido, podemos também definir três eixos principais, os eixos do material, que apresentarão três índices de refração distintos, n_1, n_2 e n_3, indicados na tabela 1.

Tais eixos ficariam assim definidos: o eixo 1 ao longo das colunas obtidas, o eixo 2 é perpendicular ao plano de deposição, e o eixo 3 é paralelo a este plano e perpendicular aos demais eixos. Os três eixos estão relacionados por um produto vetorial ("regra da mão direita").

Assim, dado que saibamos o ângulo sob o qual foi depositado um material, podemos saber quais os três índices de refração principais e qual o ângulo das colunas no material (Hodgkinson et al, 1997).

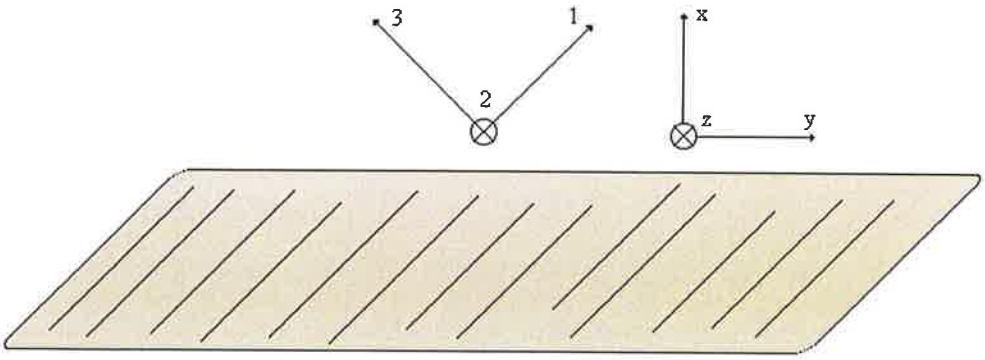


Fig. 8: Estrutura colunar em um filme obtido por deposição em ângulo num *e-beam*.

O ângulo das colunas pode ser obtido como uma aproximação a partir da regra da tangente que estipula que (Hodgkinson et al, 1997):

$$\tan(\psi) = \frac{1}{2} \cdot \tan(\phi) \qquad (3.2\text{-}1)$$

onde ψ é o ângulo apresentado pelas colunas obtidas no material e ϕ é o ângulo de deposição, como mostrado na figura 9 e no gráfico da figura 10.

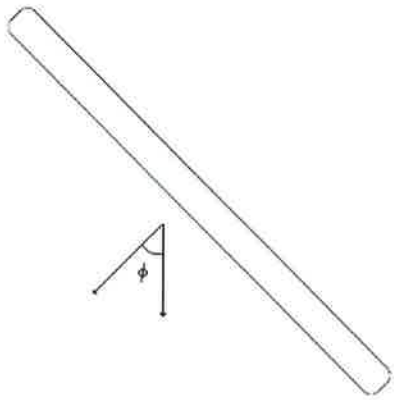


Fig. 9: Deposição por *e-beam* em ângulo (ϕ).

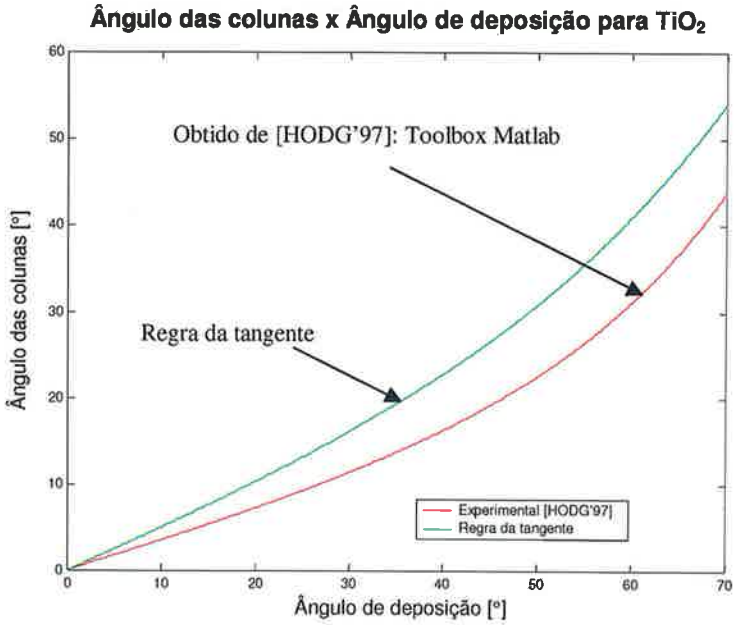


Fig. 10: Relação entre o ângulo colunar e o ângulo de deposição para o TiO_2 (Hodgkinson et al, 1997).

Como vimos, um material dielétrico depositado em ângulo pode ser capaz de exibir comportamento birrefringente (birrefringência de forma). Assim, o critério que utilizamos para escolher o TiO_2, dentre todos os outros materiais, prende-se a questões de facilidade de processamento e obtenção do material-base (alvos de Ti são comumente empregados na microeletrônica e portanto, facilmente disponíveis). Além disso, resultados de simulação reportados no livro de Hodgkinson, et al. (1997) mostram que o TiO_2 apresenta maior diferença entre os índices de refração para polarizações *p* e *s* quando comparado com outros materiais (por exemplo, TaO_2 e ZrO_2). Esses resultados, para um comprimento de onda de 550 nm, podem ser vistos nas figuras 11, 12 e 13. Luz com polarização *p* apresenta o vetor campo elétrico paralelo ao plano de incidência ao passo que na polarização *s*, temos o vetor campo elétrico perpendicular ao plano de incidência. Esses tipos de polarização da luz serão retomados e apresentados detalhadamente no item 3.5.

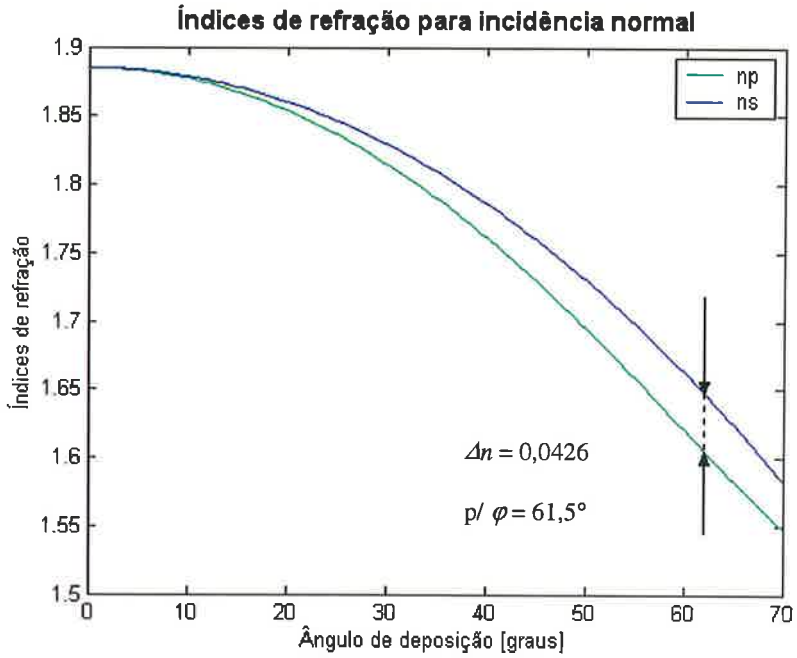


Fig. 11: Índices de refração n_p e n_s para ZrO_2 (Hodgkinson et al, 1997).

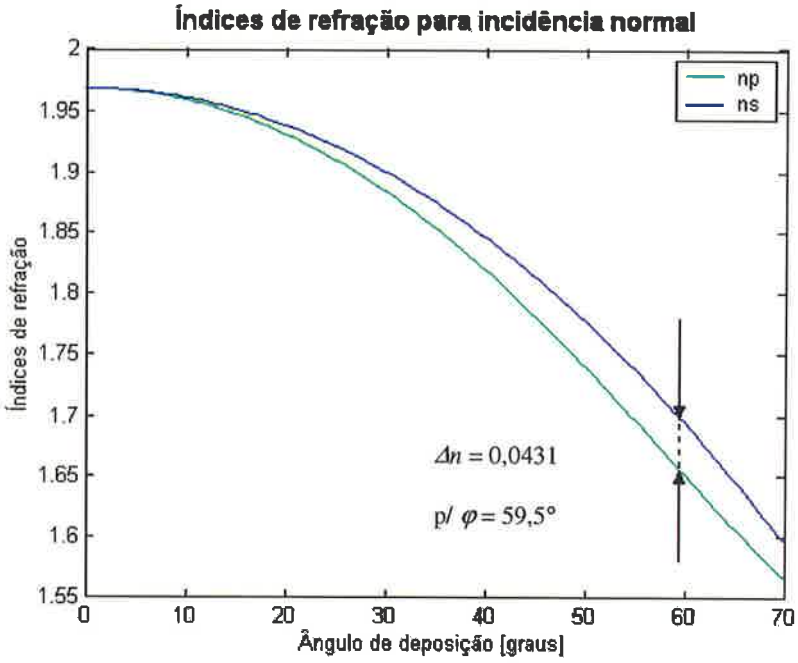


Fig. 12: Índices de refração n_p e n_s para TaO_2 (Hodgkinson et al, 1997).

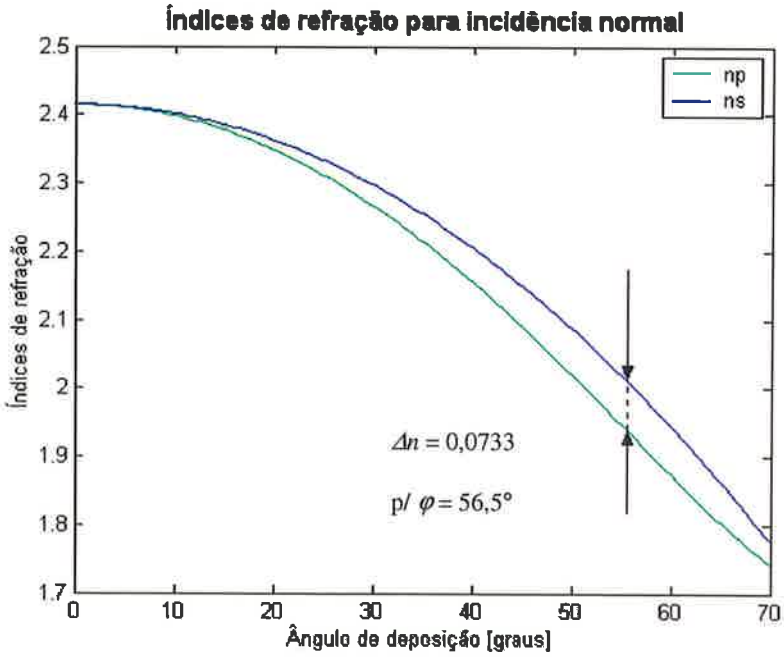


Fig. 13: Índices de refração n_p e n_s para TiO_2 (Hodgkinson et al, 1997).

Dados os três eixos do material, esboçados na figura 8, sempre podemos definir três diferentes índices de refração, mas em particular para o caso de incidência normal, dois são suficientes (Hodgkinson et al, 1997) e serão doravante conhecidos por n_p e n_s, que é como aparecem nas figuras 11, 12 e 13, e são os índices "vistos" pela luz com essas polarizações (*p* e *s*).

O TiO_2 apresenta duas grandes vantagens em relação aos outros materiais para os quais temos dados de literatura: ele apresenta a maior diferença de índices de refração, e portanto a maior birrefringência, e o ângulo onde essa diferença é máxima, é menor do que para os outros dois casos ($\varphi = 56{,}5^{o}$).

3 – IMAGENS DE DIFERENÇA DE POLARIZAÇÃO DA LUZ (PDI)

A maioria dos sistemas de aquisição de imagens disponíveis hoje em dia (Audet et al., 1989); (Blum et al., 1992); (Blum et al., (1995); (Caputo et al., 1999); (Hoctor et al., 1996); (Kozick et al., 1991); (Kozick et al., 1993); (Magalhães et al., 1995); (Smith, 1998); (Sunetra et al., 1997); e (Yates et al., 1992) é composta por um sistema óptico (lentes, espelhos, etc.) responsável pela focalização dos raios luminosos no chamado plano de imagem, onde há uma matriz de elementos sensíveis à luz, num comprimento de onda apropriado.

Essa matriz de elementos sensíveis, geralmente capacitores MOS no caso de câmeras CCD, é a responsável pela formação dos quadros[1], que se dispostos seqüencialmente no tempo, produzem um filme, ou seja, imagens em movimento.

Cada elemento sensível captará a intensidade luminosa local respondendo pois, por um *pixel* do quadro. Assim, quanto mais distanciados estiverem os sensores, menor a qualidade da imagem obtida.

Quando passamos de um sistema de aquisição de imagens para outro, geralmente o que se modifica é o sistema de sensores mas, em geral, sempre é feita a captação da intensidade da luz no correspondente *pixel* para um dado comprimento de onda. A obtenção de imagens coloridas requer o uso de óptica dedicada para separar o feixe luminoso incidente em três comprimentos de onda diferentes (RGB) e através da composição dos três feixes pode-se obter a imagem final em cores.

Tais sistemas apresentam limitações quanto ao seu uso em função das características do feixe de luz incidente, pois se este não possuir intensidade suficiente, não poderá sensibilizar a matriz de sensores, ficando o sinal abaixo do nível de ruído. Por outro lado, se o meio onde o feixe se propaga for altamente dispersivo, então teremos, conforme se vê na figura 14, quatro "tipos" de feixes luminosos (Tyo et al., 1996), donde somente o feixe 1 vai realmente mapear a intensidade de luz provinda do objeto, *O*, para o sensor, *S*. O feixe 2 produz um falso sinal pois faz parecer que um feixe que não provém do objeto, seja mapeado como

[1] *Frames* em inglês.

tal. Os feixes 3 e 4 são responsáveis pela queda de intensidade do sinal, onde o feixe 3 é desviado para fora do campo do sensor e o feixe 4 é absorvido no meio.

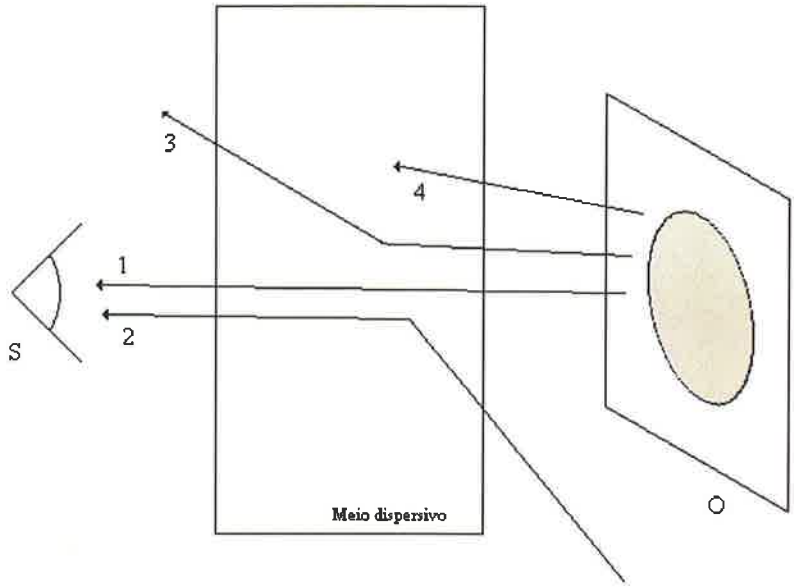


Fig. 14: Propagação da luz em meios altamente dispersivos. *S*: sensor, *O*: objeto.

Não há como compensar a perda de sinal devido aos feixes 3 e 4[2], mas podemos reduzir os efeitos relacionados ao feixe 2, que é o responsável pela queda da relação sinal/ruído do sistema.

Para tanto, uma possibilidade é utilizarmos sistemas que sejam sensíveis não só à intensidade da luz incidente mas também ao seu estado de polarização.

Tal método é funcional pois, num meio dispersivo, a luz provinda do ambiente é essencialmente não polarizada ou muito pouco polarizada (Magalhães et al., 1996); e (VASÍCEK, 1960), o que permite a sua eliminação como sinal de fundo (*background*), desde que o objeto emita luz (própria ou refletida) com uma dada assinatura de polarização. Um sistema sensível ao estado de polarização poderia cancelar todo o sinal provindo do ambiente, e que é ruído, amplificando somente o sinal que provenha do objeto analisado, apenas subtraindo as imagens obtidas para dois ângulos de polarização perpendiculares entre si.

[2] Mesmo captando o feixe 3, ele seria mapeado como não pertencente ao objeto.

Para entendermos melhor tal sistema, precisamos analisar as propriedades das imagens, e seus sistemas de obtenção, sensíveis ao estado de polarização da luz.

3.1 – Características das PDI's

As imagens obtidas através da diferença de polarização da luz apresentam como características a capacidade de rejeição de modo-comum e indicação da direção de polarização da luz (se paralela ou perpendicular a um dado ângulo) para cada região da imagem. Também permitem a determinação local do nível de polarização linear da luz.

A primeira característica, rejeição de modo-comum, significa que é possível eliminarmos da imagem todo ponto que não apresente um nível mínimo de polarização da luz.

Essa característica é bastante importante pois, além de permitir uma perfeita distinção entre regiões com e sem polarização (os pontos que não apresentam um nível significativo de polarização, quando se faz a subtração de intensidades para as duas imagens, acabam ficando com valores próximos de zero), também permite um aumento da capacidade de contraste para imagens obtidos em meios altamente dispersivos.

Isso se dá pois o meio tende a espalhar a luz sem um sentido preferencial de polarização, ao passo que a superfície de análise pode apresentar um nível de polarização não nulo. Com isso, na subtração das imagens, o meio, que não apresenta um nível de polarização, é rejeitado, aumentando-se o contraste e conseqüentemente a visibilidade.

Outra característica desse sistema de aquisição de imagens é o aumento do contraste entre regiões que apresentem originalmente uma diferença de polarização da luz refletida e/ou emitida.

Para efeito de mensuração e de caracterização do meio, uma abordagem possível, mas que não foi aqui implementada, é o levantamento da curva de transferência óptica obtida com o uso de lasers e transformadas de Fourier. Com isso teríamos parâmetros mais exatos para a comparação dos resultados, mas isso vai um pouco além do escopo do presente trabalho.

3.2 – Aplicações

Pelo que foi dito no item 3.1 acima, podemos empregar PDI's para obtenção de imagens com boa visibilidade mesmo em ambientes com alta concentração de elementos dispersivos, como partículas em suspensão na água (visão no fundo do mar ou rios) ou mesmo no ar, num ambiente com alto nível de poeira de vários tipos em suspensão.Também se pode encontrar aplicações para PDI's em polarimetria astronômica (Magalhães et al., 1995) ou na medicina. Assim, uma possível lista para áreas com aplicações de PDI's poderia ser (Tyo, 2000): sensoriamento remoto, microscopia, visão de máquina e detecção de alvos em ambientes dispersivos.

3.3 – Um esquema para obtenção de PDI's

O sistema de aquisição de imagens proposto por Tyo et al. (Tyo et al., 1996) pode ser esquematizado da seguinte forma:

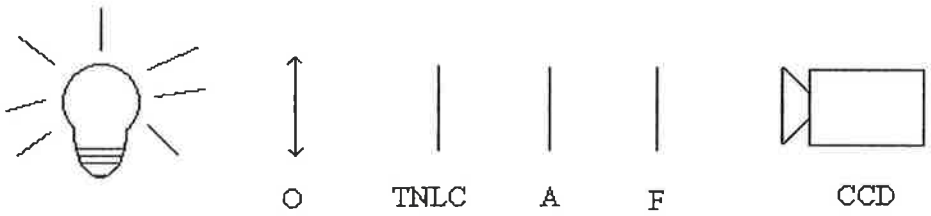


Fig. 15: Um sistema de aquisição de imagens sensível ao estado de polarização da luz.

Na figura 15, *O* é o objeto analisado, *TNLC* (*Twisted Nematic Liquid Crystal*) é um dispositivo baseado em cristal líquido que promove a rotação do eixo de polarização da luz transmitida dependendo de haver ou não um potencial elétrico aplicado, *A* é um analisador, ou seja, um polarizador linear e *F* é um filtro *Narrow-Band* que serve para restringir o comprimento de onda da luz incidente dentro dos limites de atuação dos demais dispositivos (*A* e *TNLC*).

Devido à presença de *F*, o sistema é essencialmente monocromático, mas os autores propuseram (Tyo et al., 1998) um método para mapear o estado de

polarização do objeto em um sistema de cores falsas (*pseudocolor*), conforme visto mais adiante.

O objeto *O* é um disco de alumínio com dois adesivos, que refletem a luz sob uma determinada polarização, colados à sua superfície. Tais adesivos são, por exemplo, os detalhes que desejamos distinguir do objeto (fig. 16).

O princípio de funcionamento desse sistema é o seguinte: a luz refletida por *O* apresenta um ligeiro grau de polarização introduzido pelos dois adesivos em sua superfície. A partir daí, atuando ou não o TNLC (uma rotação de 90°), *A* deixará passar a luz em um ou outro estado de polarização, perpendiculares entre si e aqui denominados, respectivamente, *p* e *s*. A câmera CCD captará então primeiramente a imagem obtida com polarização *p*, que será enviada a um microcomputador e em seguida captará e enviará a imagem obtida com polarização *s*.

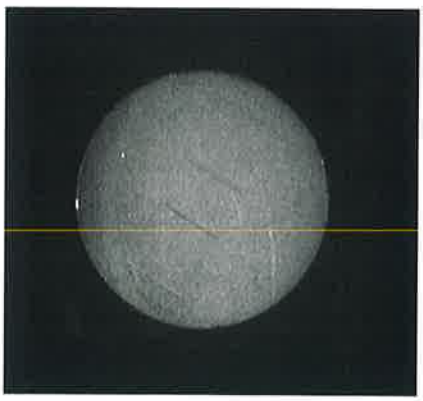


Fig. 16: Objeto usado por Tyo et al. (1996) para testes, aqui vistos numa imagem de soma.

A partir desses dois quadros, podemos obter duas imagens, uma formada pela soma *pixel* a *pixel* dos dois quadros que é a imagem que obteríamos em um sistema de aquisição de imagens não-sensível ao estado de polarização da luz, e uma outra imagem formada pela diferença *pixel* a *pixel* dos dois quadros, conforme se vê a seguir:

$$I_S(x,y) = I_p(x,y) + I_s(x,y) \qquad (3.3\text{-}1)$$

$$I_D(x,y) = I_p(x,y) - I_s(x,y) \qquad (3.3\text{-}2)$$

onde I_S é a imagem-soma, não-sensível ao estado de polarização, I_D é a imagem-diferença que é dependente da polarização da luz, I_p é a intensidade da luz relativa ao estado de polarização p e I_s é a intensidade relativa à polarização s.

As imagens obtidas por 3.3-1 e 3.3-2 devem ainda sofrer uma transformação linear para ajustar o valor da intensidade de cada *pixel* dentro dos limites do monitor onde serão exibidas, por exemplo em 256 tons de cinza, para representação em 8 bits.

Tal transformação é dada pelas equações a seguir:

$$I_S^T = \gamma_S \cdot [I_S(x,y) - I_S(x,y)_{\min}] \tag{3.3-3}$$
$$I_D^T = \gamma_D \cdot [I_D(x,y) - I_D(x,y)_{\min}] \tag{3.3-4}$$

onde os γsão dados por:

$$\gamma_S = C / [I_S(x,y)_{\max} - I_S(x,y)_{\min}] \tag{3.3-5}$$
$$\gamma_D = C / [I_D(x,y)_{\max} - I_D(x,y)_{\min}] \tag{3.3-6}$$

onde C é o nível máximo suportado pelo monitor, no nosso exemplo 255 para 8 bits.

A partir desse método simples obtemos então duas imagens de forma rápida e sem exigir processamentos excessivos. I_S é insensível à polarização da luz devido ao fato de que a luz não-polarizada pode ser decomposta em duas componentes de polarizações perpendiculares entre si. Daí se somarmos ambas as componentes voltaremos a obter a luz não-polarizada inicial.

3.3.1 – PDI em cores

Tyo et al. (1998) propuseram um novo esquema que mapeia o estado de polarização local da luz para um sistema de pseudocores. Tal esquema utiliza a informação dos dois tipos de imagens disponíveis, ou seja, a imagem de soma (insensível ao estado de polarização) e a imagem de diferença de polarização da seguinte maneira:

$$I_S \equiv I_p + I_s \rightarrow B \tag{3.3.1-1}$$

$$I_D \equiv I_p - I_s \rightarrow S \qquad (3.3.1\text{-}2)$$

$$2 \cdot \phi_0 \rightarrow (H, H + 180°) \qquad (3.3.1\text{-}3)$$

onde H significa *Hue*, S, *Saturation* e B, *Brightness*, ou seja, as cores são especificadas segundo o padrão HSB. ϕ_0 é o ângulo sob o qual é inclinado o eixo do analisador (A na figura 15) em relação à vertical.

Assim, a intensidade da imagem de soma é mapeada diretamente para a intensidade da imagem final através do parâmetro B (eq. 3.3.1-1), a sua saturação, que expressa a "pureza" da cor, é mapeada pela intensidade da imagem de diferença de polarização. Como a grandeza *Saturation* é não negativa, variando de um valor mínimo a um máximo (0 a 1, por exemplo), e a intensidade de I_D pode ser negativa, o que foi proposto pelos autores é tomar-se o valor absoluto de I_D e, através do sinal da mesma, decidir por um ou outro dos dois valores de *Hue* esquematizados na eq. 3.3.1-3, e que são valores opostos (H ou H + 180°).

Nesse sistema, o objeto de testes apresentado na figura 16 apareceria como mostrado na figura 17.

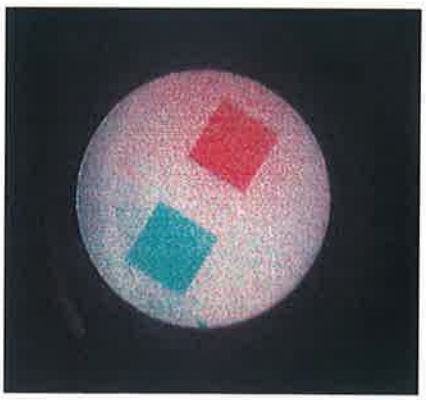


Fig. 17: Objeto visto pelo método proposto por Tyo et al. (1998).

As figuras 18 e 19 ilustram melhor como são definidos os parâmetros HSB.

A figura 19 representa um corte (igual intensidade ou *Brightness*) da figura 18, onde podemos ver a variação da grandeza *Hue* (uma grandeza angular) que especifica o "tipo" de cor. Nesse esquema, *Saturation* seria a distância (raio) desde o centro do círculo da figura 19 até o ponto que especifica a cor. Quanto menor o valor

de S, mais próximo do centro e, portanto, mais próximo de um valor de cinza (se B for grande o ponto central tende para o branco se for pequeno para o preto, valores intermediários dão as diversas tonalidades de cinza).

Assim, para uma dada imagem, os pontos que apresentam uma característica acentuada de polarização (alto valor de I_D e portanto alto valor de S) apresentarão uma das duas cores (*Hue*) definidas através do ângulo do analisador (eq. 3.3.1-3), dependendo do sinal de I_D. Já os pontos sem uma assinatura definida de polarização tendem a se apresentar sob tons de cinza.

A intensidade de cada ponto depende do seu valor na imagem de soma, mas se houver algum problema, como por exemplo a presença de uma grande área de sombra encobrindo parte da imagem, então a equação 3.3.1-1 pode ser ignorada e o valor de B pode ser ajustado, arbitrariamente, para toda a imagem final sem que com isso se perca a informação sobre o estado de polarização de cada região.

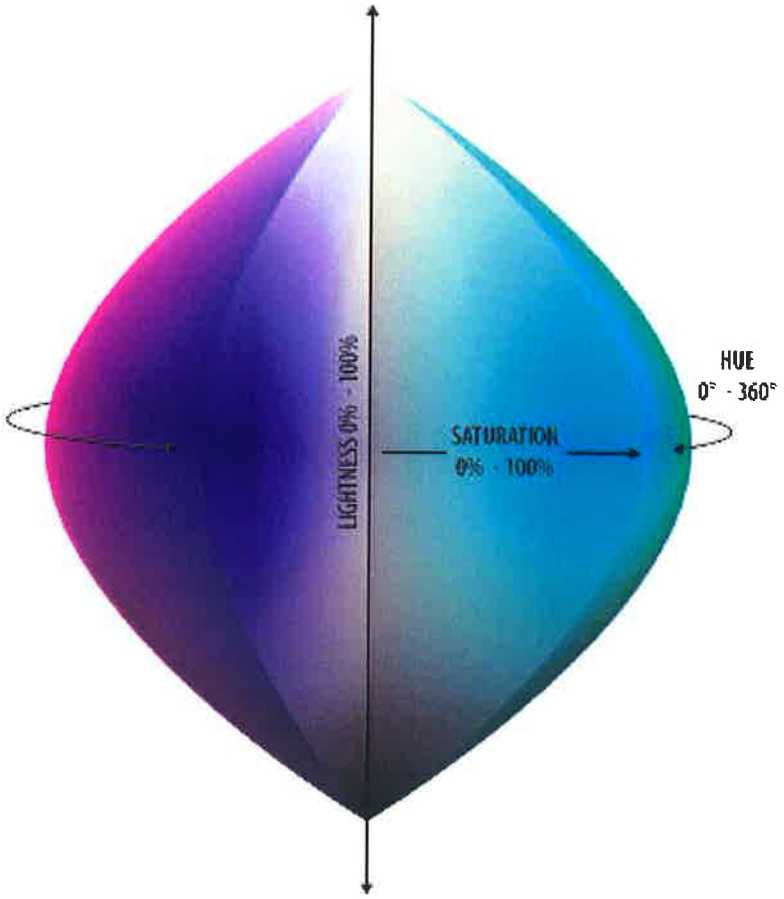


Fig. 18: Representação Gráfica dos parâmetros HSB.

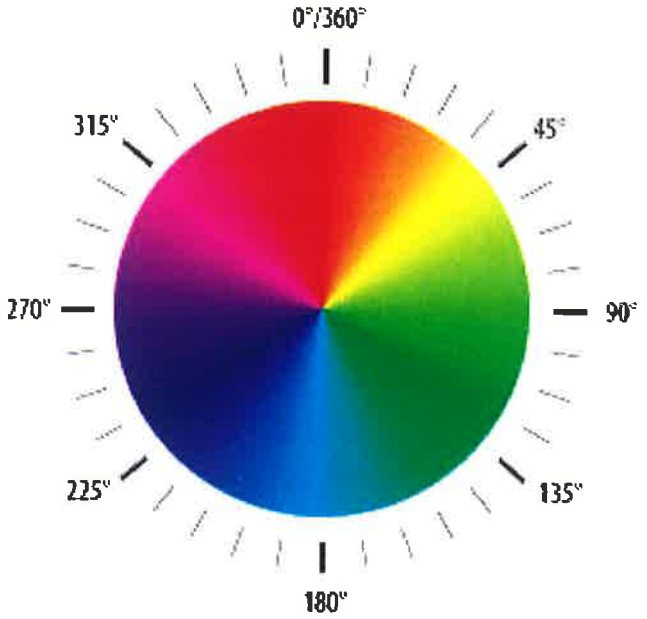


Fig. 19: Variação da grandeza *Hue*.

No esquema de mapeamento de cores proposto por Tyo et al. (1998), o valor da intensidade (em função da imagem de soma) deve ser ajustado (eq. 3.3-3) de forma a ocupar todo o espectro disponível (256 níveis de cinza para 8 bits). Já o valor de S é mapeado de forma que o valor mínimo de I_D corresponda ao valor máximo de saturação para $H + 180° = 2 \cdot \phi_0$, e o valor máximo de I_D corresponda ao valor máximo de saturação para $H = 2 \cdot \phi_0$.

3.4 – Um microssistema integrado

O sistema proposto por Tyo et al. (1996) é um sistema discreto, ou seja, utiliza-se de dispositivos e equipamentos discretos (filtro, TNLC, analisador e câmera) para conseguir imagens sensíveis ao estado de polarização da luz.

Outra possibilidade, que é inclusive explorada no presente trabalho, é o uso redundante de dois sensores para cada *pixel* da imagem, sendo que cada um deles é

sensível a apenas uma das componentes de polarização linear da luz incidente[3]. Um sistema assim foi proposto por Kalayjian et al. (1999).

A figura 20 ilustra o sistema idealizado por Kalayjian.

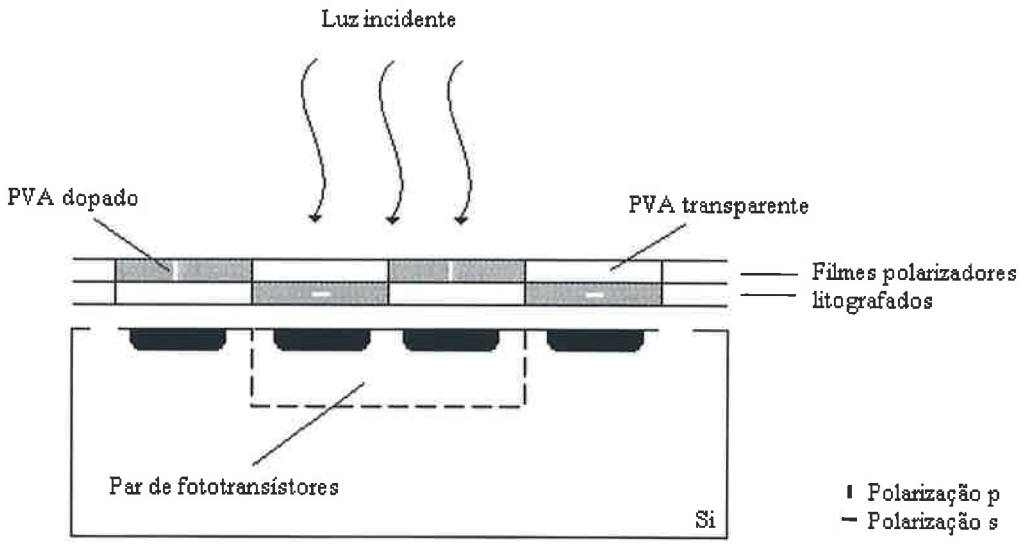


Fig. 20: Sistema proposto por Kalayjian et al. (1999).

Tal sistema emprega dois filmes de PVA (Poli-Vinil-Alcohol) dopados com íons de iodo que, mediante processo de fabricação, apresentam propriedades de polarização linear sobre a luz transmitida pelo filme.

Tais filmes são disponíveis comercialmente, mas para o seu emprego no trabalho ora discutido é necessária uma etapa de litografia para a abertura de janelas não-polarizadoras no filme, que na figura 20 aparecem como zonas brancas.

Assim, sobrepondo-se filmes com polarizações ortogonais e procedendo-se à litografia com mascaramento adequado, pode-se conseguir que sensores vizinhos sejam posicionados sob filtros de diferentes polarizações.

Como a corrente, ou tensão, dos sensores é uma função da intensidade da luz incidente, e como a intensidade da luz sobre cada um dos sensores é devida apenas a uma de suas polaridades, basta subtrair as correntes (tensões) de sensores vizinhos para se conseguir um sinal proporcional à diferença no nível de polarização da luz incidente.

[3] Ou pelo menos apresentar sensibilidades diferentes para cada uma delas.

Em particular, no trabalho de Kalayjian et al. (1999), os sensores são fototransistores arranjados numa matriz para a captação de imagens e o sinal de saída é a corrente foto-gerada.

Através de uma montagem que emprega o princípio translinear, os autores puderam obter diretamente um sinal de saída, no caso uma corrente, que é diretamente proporcional ao contraste de polarização da imagem. A figura 21 apresenta o circuito translinear utilizado no trabalho.

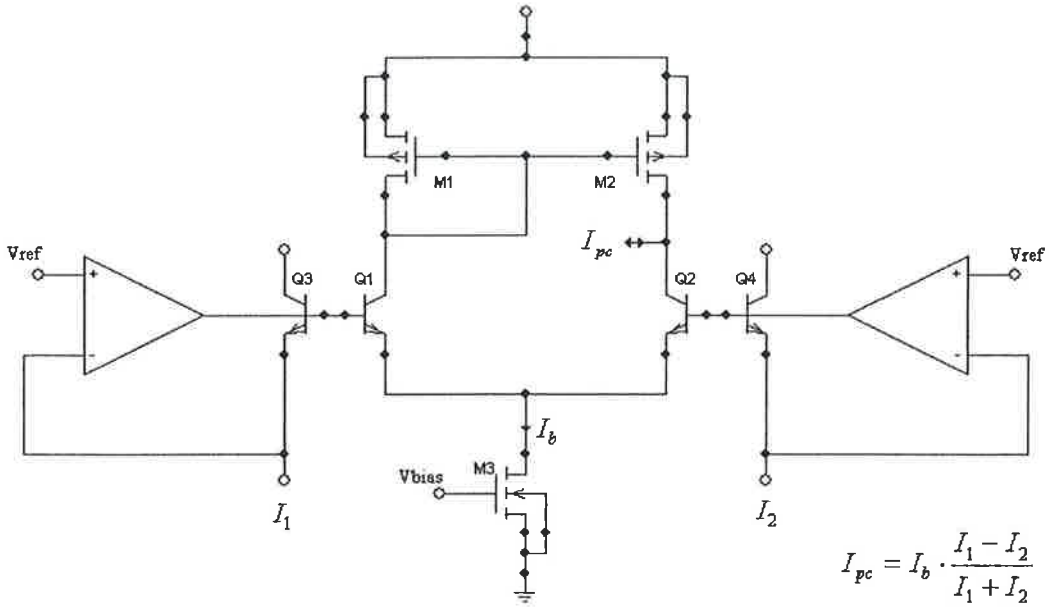


Fig. 21: Circuito translinear. A corrente de saída, I_{pc}, é diretamente proporcional ao contraste de polarização da imagem.

O contraste de polarização pode ser definido como segue:

$$CP = \frac{T_p - T_s}{T_p + T_s} \tag{3.4.1}$$

Como as correntes geradas nos fototransistores são proporcionais às intensidades transmitidas (T's), então a corrente I_{pc} é proporcional ao contraste de polarização apresentado pela imagem e pode alimentar diretamente um sistema de vídeo. Assim, teríamos uma imagem de diferença de polarização disponível em formato de vídeo sem a necessidade de uma outra etapa de processamento de sinal.

3.5 – Polarização da luz

Todo sistema de aquisição de imagens sensível ao estado de polarização da luz só é realizável se o objeto cuja imagem está sendo tomada puder influenciar de alguma forma a assinatura de polarização da luz que ele reflete, ou emite, ou que é transmitida através dele.

Apresentamos a seguir, alguns conceitos básicos sobre polarização da luz, bem como algumas simulações que comprovam que todo material, quer seja metálico, quer seja dielétrico, pode polarizar a luz, o que implica na possibilidade prática de utilização de sistemas de diferença de polarização, como os apresentados aqui, mesmo com iluminação natural, não-polarizada.

Assim, a luz pode ser encarada como uma onda eletromagnética (fig. 22) onde os campos elétrico e magnético variam no tempo e no espaço, permanecendo sempre ortogonais entre si. Como os campos elétrico e magnético estão ligados por uma relação de proporcionalidade, dado que saibamos o valor de um, o do outro estará automaticamente determinado. Assim, só nos preocuparemos com o vetor campo elétrico. Em geral o campo elétrico varia em torno do eixo de propagação, mas, se por algum motivo, ele somente variar em um dado plano, dizemos que a luz apresenta-se linearmente polarizada nesse plano.

É sempre possível representar qualquer feixe de luz como sendo a composição de duas parcelas de polarizações ortogonais (fig. 22). Isso quer dizer, que se medirmos a intensidade da luz que passa através de um analisador, para dois ângulos ortogonais e depois somarmos os resultados, a soma deve ser a intensidade total da luz incidente (imagem de soma de polarização).

Torna-se assim, possível a escolha de quaisquer duas direções perpendiculares quando da análise de um feixe de luz, pois qualquer que seja a escolha, pode-se reconstituir o feixe original a partir da soma das intensidades medidas (Hariharan, 1992).

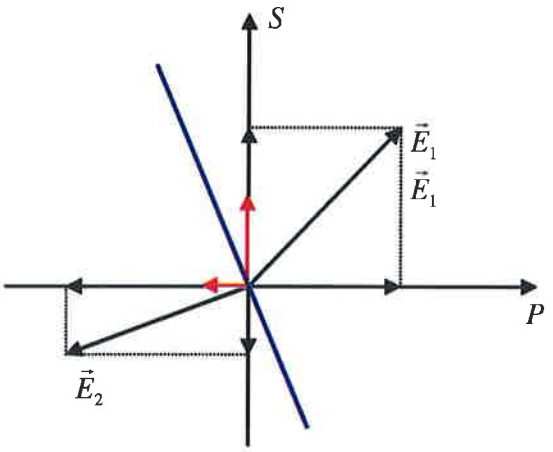


Fig. 22: Decomposição do vetor campo elétrico em duas parcelas de polarizações ortogonais.

Na figura 22 vemos um exemplo do que falamos acima: em vermelho temos a resultante da soma dos vetores dos dois campos elétricos constituintes desse particular feixe de luz. Em azul vemos a representação do plano de polarização da luz, que, como dito anteriormente, não precisa necessariamente coincidir com nenhum eixo pré-estabelecido.

A figura 22 é uma representação instantânea para a interação entre dois, ou mais, campos elétricos compondo um feixe de luz. Se os vetores representados girassem aleatoriamente ao redor do eixo de propagação (que é perpendicular ao plano da folha) diríamos que a luz é não polarizada, pois não haveria um plano de polarização. Mas se o que foi representado na figura 22 permanecer estático ao longo do tempo, aí então poderemos dizer que a luz é plano-polarizada, com o plano de polarização indicado em azul.

Como dissemos antes, os vetores campo elétrico e campo magnético são mutuamente perpendiculares e, em geral, perpendiculares também à direção de propagação (Hodgkinson et al., 1997). Quando o feixe de luz incide em uma superfície, ou quando passa de um meio de propagação para outro, ocorrem fenômenos de refração que variam com o ângulo de incidência em relação à normal da superfície de separação entre os meios, com a condutividade do meio de incidência e com a polarização da luz.

A direção de propagação e a normal à superfície de separação entre os meios definem um plano que chamaremos de plano de incidência (plano da página na figura

24). A partir dessa definição podemos estabelecer duas direções, uma perpendicular e outra paralela ao plano de incidência e os correspondentes eixos de polarização. No caso em que o vetor campo elétrico é paralelo ao plano de incidência (figura 24-a) dizemos que o eixo de polarização está também paralelo ao mesmo plano de incidência. De forma análoga, no caso em que o vetor campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência, equivalentemente temos o eixo de polarização perpendicular ao mesmo plano de incidência. Ao eixo de polarização paralelo ao plano de incidência chamaremos *p* e ao perpendicular *s* ou, ainda, simplesmente polarização *p* e polarização *s*, respectivamente.

Assim, na figura 22 temos que a luz é polarizada preferencialmente na direção *s*, mas com uma pequena componente na direção *p*.

Fenômenos de polarização são bastante comuns no dia a dia, como por exemplo, a luz que provém do sol é essencialmente não polarizada mas ao atingir a nossa atmosfera (fig. 23), ela é refratada preferencialmente no sentido perpendicular em relação à normal do ponto onde o raio incidiu na atmosfera.

As abelhas utilizam essa particularidade para fins de orientação de vôo ao redor da colméia (Magalhães et al., 1996).

Da mesma forma, a luz refletida por um objeto também pode apresentar um certo grau de polarização.

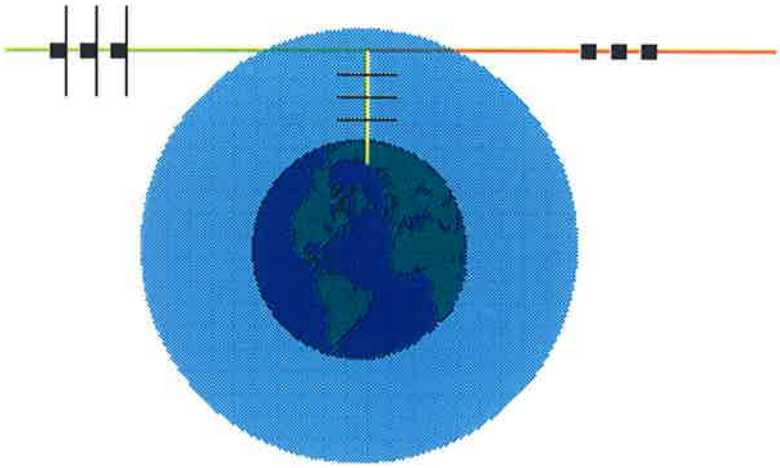


Fig. 23: Polarização da luz solar em interação com a atmosfera da Terra.

Voltemos então ao problema da refração de um feixe de luz quando o mesmo incide sobre uma superfície de metal, a partir de um meio de índice de refração n_1 (fig. 24).

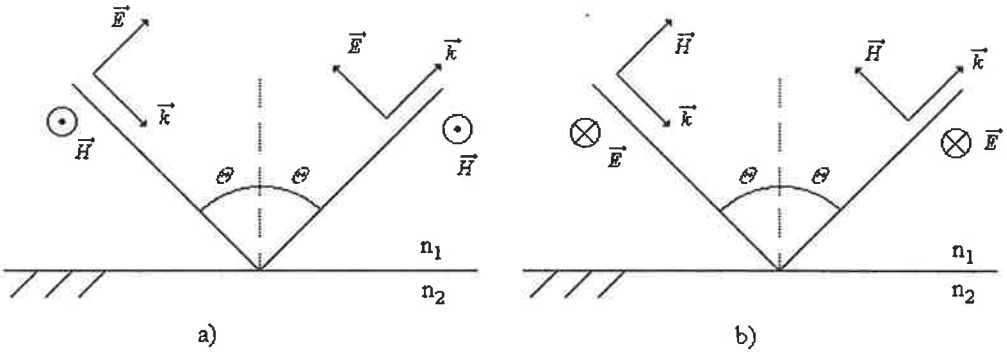


Fig. 24: Incidência de luz sobre metal. a) Campo elétrico paralelo (*p*); b) e perpendicular (*s*).

Sabemos que a componente do campo elétrico tangencial à interface deve ser preservada, na ausência de cargas interfaciais. Com isso, temos que o valor do campo elétrico incidente deve ser igual ao valor do campo refletido a não ser por uma parcela absorvida dentro do metal (efeito de *skin*, fig. 24). Tal parcela será maior para o caso de polarização *p* do que *s* já que no primeiro caso há uma componente do campo na direção normal à superfície (fig 24 a)) (Hodgkinson et al., 1997).

Apesar de pequenas essas diferenças, isso implica que a luz refletida a partir de uma superfície de metal deve apresentar um pequeno grau de polarização.

Podemos então definir um índice de polarização da seguinte forma:

$$IPL^R = abs\left(\frac{R_P - R_S}{R_P + R_S}\right) \tag{3.5-1}$$

$$IPL^T = abs\left(\frac{T_P - T_S}{T_P + T_S}\right) \tag{3.5-2}$$

onde $abs(\cdot)$ indica valor absoluto e os símbolos R e T representam índice para reflexão e transmissão respectivamente.

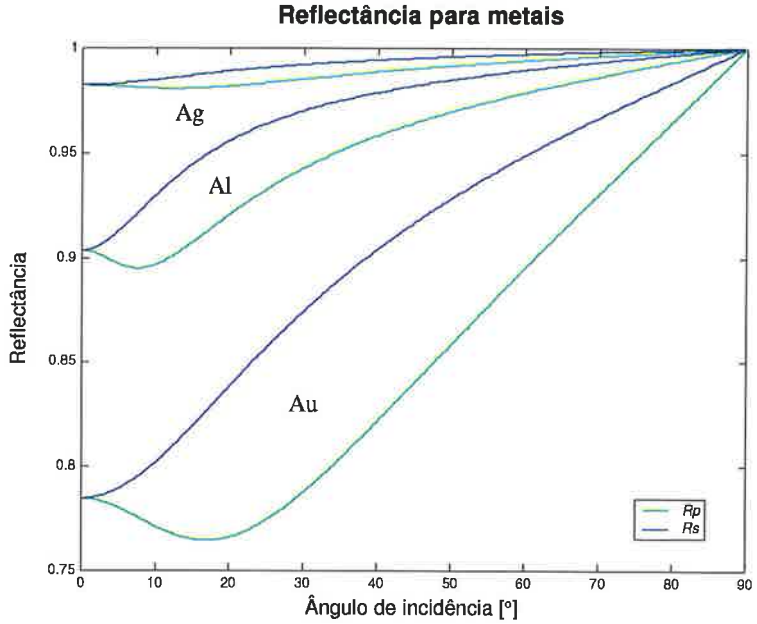


Fig. 25: Reflectância para a prata, o alumínio e o ouro. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997).

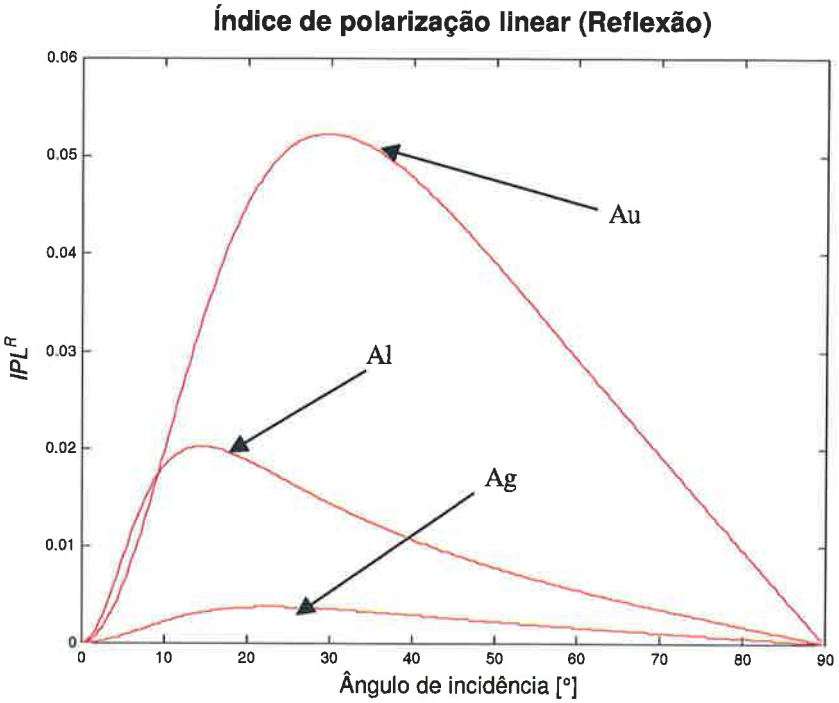


Fig. 26: Índice de polarização linear por reflexão. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997).

Para o caso de metais, não há índice de polarização por transmissão pois estamos tratando aqui apenas com espessuras grandes demais para serem consideradas transparentes.

Na figura 25 vemos a reflectância para três metais, a prata (Ag), o ouro (Au) e o alumínio (Al), e na figura 26 vemos o índice de polarização como definido pela eq. 3.5-1, plotados em função do ângulo sob o qual a luz incide nos metais.

A primeira observação importante na figura 26 é que o valor de IPL^R é pequeno nos metais, sendo que o ouro, dentre os três, é o que apresenta o maior índice de polarização.

Na figura 25 reparamos que, por serem metais, a reflectância é bastante alta, sendo que o pequeno grau de polarização observado é devido à absorção da luz pelo dado metal. Se o meio sobre o qual a luz incide não for metálico mas sim dielétrico, então teremos a situação delineada na figura 27.

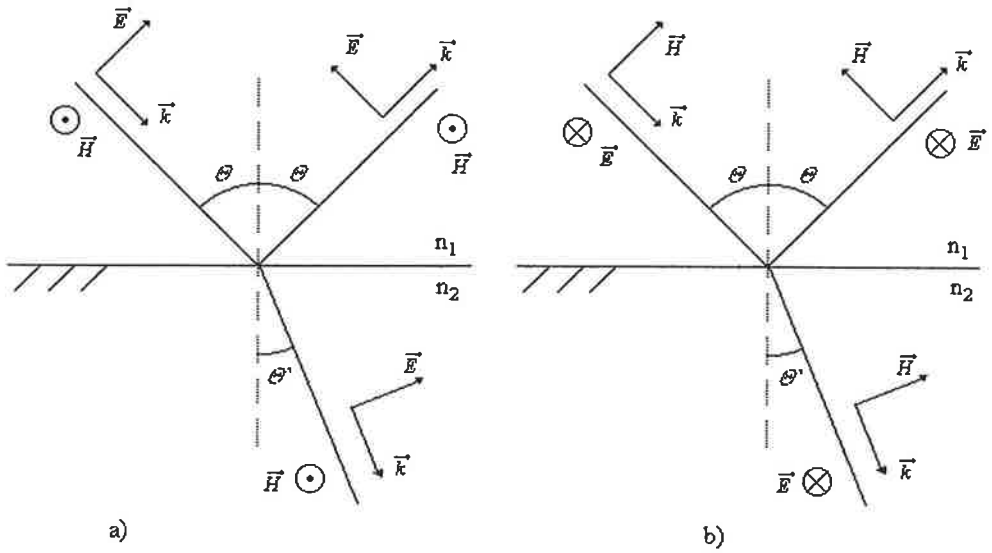


Fig. 27: Incidência da luz sobre um meio sem perdas. a) Campo elétrico paralelo (polarização *p*). b) perpendicular (polarização *s*).

Nesse caso, não haverá polarização da luz por perdas, já que admitimos que o dielétrico seja ideal, mas como haverá um feixe transmitido, então teremos de estudar o que ocorre com a reflexão e transmissão para ambas as polarizações (*p* e *s*).

Novamente, como no caso para metais, temos que a componente tangencial do campo elétrico deve ser preservada, e novamente aqui, haverá distinção entre o comportamento do campo elétrico quando o mesmo for paralelo ao plano de incidência e quando ele for perpendicular.

Assim, vamos novamente plotar os gráficos de reflectância e do índice de polarização para dois materiais, o dióxido de silício (SiO_2) e o dióxido de titânio (TiO_2), que possuem índices de refração bem distintos (1,46 para o primeiro e 2,41 para o segundo).

Desta vez, por se tratar de dielétricos, podemos analisar também a luz transmitida quanto ao seu grau de polarização.

Nessas simulações, foi considerado que o feixe de luz, de comprimento de onda de 550 nm, incide a partir do ar sobre um substrato do material em questão (SiO_2 e TiO_2).

Primeiramente, vale notar (fig. 28) que a reflectância é maior quanto maior o índice de refração (para incidência normal) e, portanto, o grau de polarização será maior já que a componente paralela sempre se anula para um dado ângulo, chamado ângulo de polarização ou de Brewster. Outro fenômeno interessante é a reflexão total que ocorre a partir de certo ângulo para ambas as polarizações.

Dada a diferença de comportamento com relação às polarizações *p* e *s*, teremos um grau de polarização introduzido tanto na luz refletida quanto na transmitida, mas somente para uma faixa que vai da incidência normal até o ângulo de reflectância total. A tabela 2 sumariza os resultados obtidos.

Tab. 2: Comparativo do grau de polarização para diferentes materiais. Tabela gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido em (Hodgkinson et al, 1997).

Material	Max. IPL^R [%]	$\theta_{máxR}$[4]	Max. IPL^T [%]	$\theta_{máxT}$	θ_{RTot}	Faixa de pol. > 1%
Ag	0,37	22,68°	—	—	—	—
Al	2,01	14,40°	—	—	—	6,0° – 42,0°
Au	5,22	29,88°	—	—	—	7,0° – 80,0°
TiO_2	100,0	22,68°	64,92	24,48°	24,84°	2,6° – 24,8°
SiO_2	100,0	34,56°	33,15	43,20°	43,56°	4,8° – 43,6°

[4] Ângulo de Brewster.

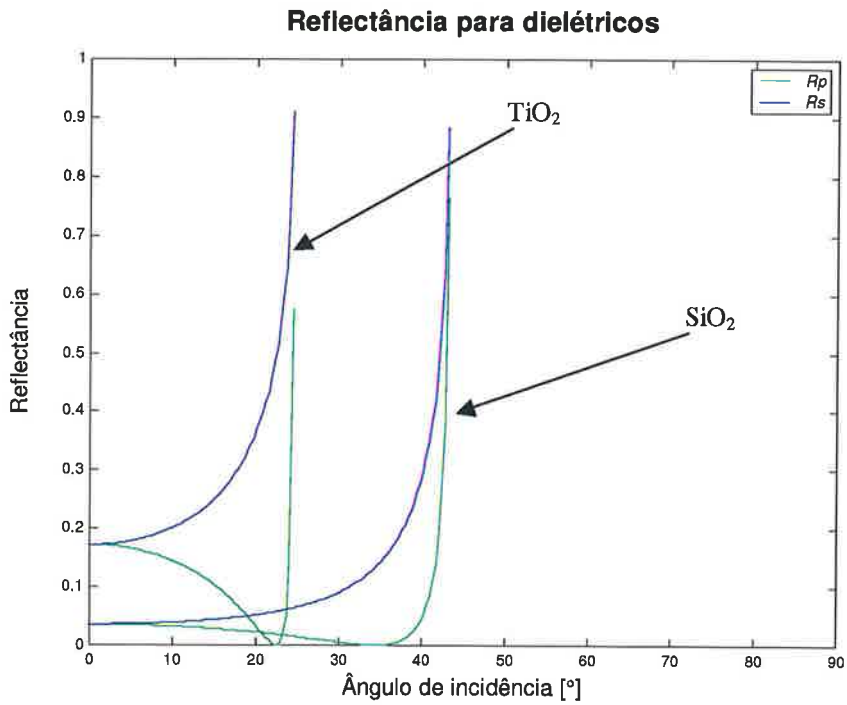


Fig. 28: Reflectância para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al., (1997).

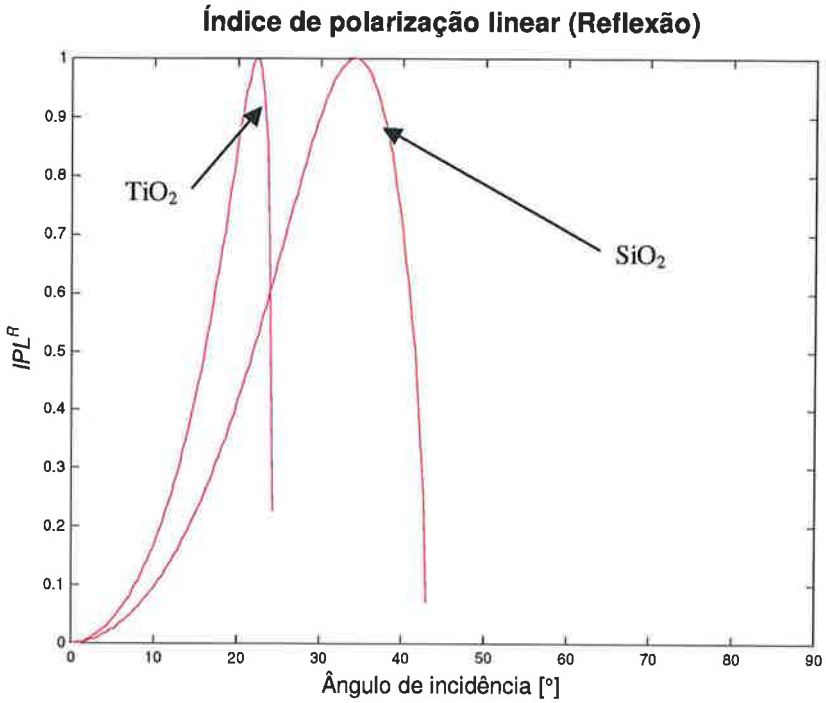


Fig. 29: Índice de polarização por reflexão para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997).

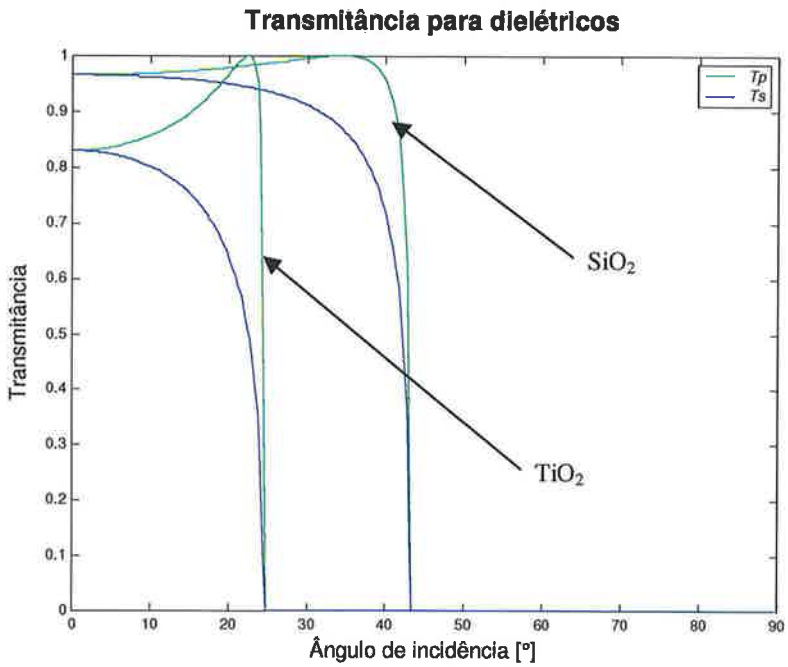


Fig. 30: Transmitância para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997).

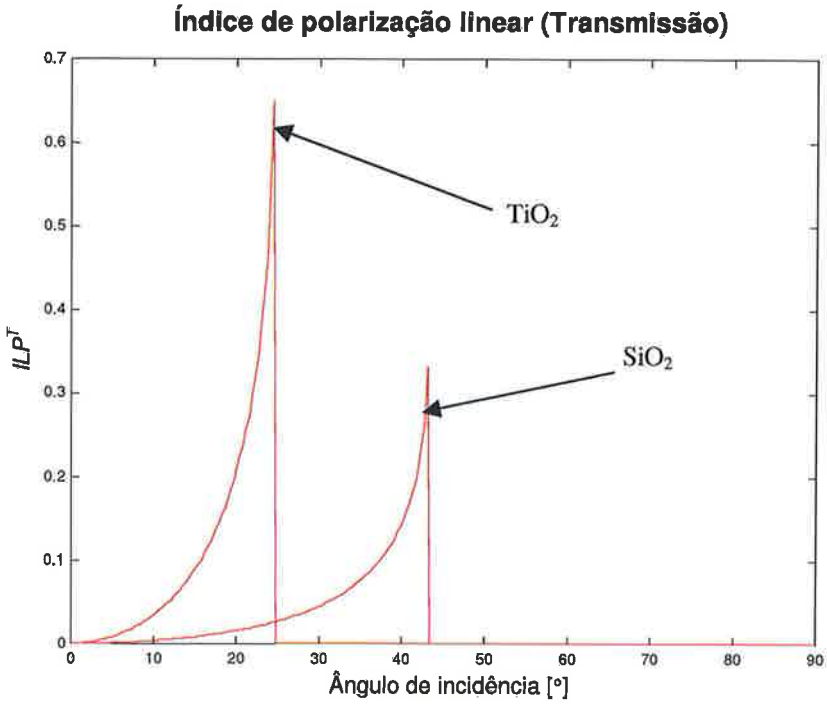


Fig. 31: Índice de polarização por transmitância para o SiO_2 e para o TiO_2. Figura gerada a partir do *toolbox* Matlab™ fornecido com o livro de Hodgkinson et al. (1997).

Da tabela 2, a principal conclusão que se tira é que todos os materiais (exceção feita à prata) apresentam uma faixa na qual a luz refletida apresenta um grau de polarização, conforme definido pela eq. 3.5-1, superior a 1%.

Esse resultado é bastante importante para os objetivos deste trabalho, já que, conforme detalhado nas secções anteriores, o uso de imagens de diferença de polarização só é possível se o objeto analisado for capaz de emitir luz (própria ou refletida) sob certo grau de polarização.

Além dessa característica dos materiais, também importa para os objetivos deste trabalho que o sistema (filtro polarizador) seja capaz de filtrar a luz incidente sobre ele de forma a discriminar as intensidades referentes às polarizações *p* e *s*.

Tal filtro, um polarizador, pode ser implementado de diversas maneiras, por exemplo, utilizando-se do fato de os dielétricos apresentarem um ângulo sob o qual toda a luz refletida possui 100% de polarização. Outro método, talvez o mais simples deles, é a utilização de uma rede de difração constituída por linhas condutoras, metais, por exemplo, como se pode ver na figura 32.

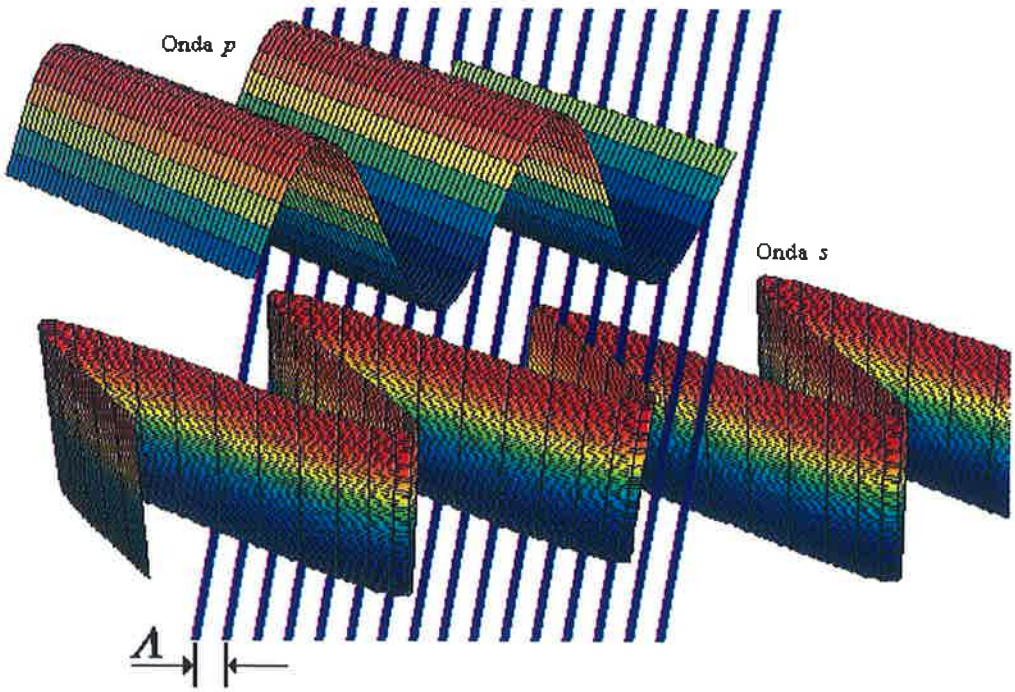


Fig. 32: Representação esquemática de uma rede de difração polarizadora, usada apenas para indicar que ondas de polarização paralela ao eixo do polarizador são bloqueadas pelo mesmo. *Λ* deve ser da ordem de nanômetros para que a rede polarize a luz na região visível do espectro.

Para uma tal rede, se o espaçamento entre as linhas condutoras for menor do que (BOMZON et al, 2001):

$$\Lambda << \frac{\lambda}{n_S} \tag{3.5-3}$$

onde Λ é o espaçamento das linhas da rede, λ é o comprimento de onda da luz incidente e n_S é o índice de refração do meio onde a luz incide (substrato), então a luz incidente cujo estado de polarização seja paralelo (onda *p*) às linhas da rede será refletida, sendo transmitido apenas o feixe de polarização perpendicular (onda *s*). Isso se dá pois o feixe paralelo "enxergará" uma superfície metálica, ou seja, refletora, sendo assim refletido de volta para o meio de incidência.

Quando a condição imposta pela equação 3.5-3 não mais se verifica, a rede deixa de atuar como um bom polarizador, transmitindo igualmente (ou quase) os dois estados de polarização da luz.

Em particular, quando o espaçamento da grade se iguala ao quociente de λ por n_S, então há uma reversão quanto à polarização transmitida, ou seja, se antes era transmitido apenas a luz cujo eixo de polarização fosse perpendicular à rede, nessa condição, será transmitida também a onda de polarização paralela.

BOMZON et al. (2001) definiram o contraste de polarização ou *PCR*, através da seguinte equação:

$$PCR = \frac{T_S}{T_P + T_S} \tag{3.5-4}$$

onde T_S e T_P são as transmitâncias para ondas de polarização *s* e *p*, respectivamente.

Assim, quando $PCR = 1$ há transmitância apenas de ondas *s*. Quando $PCR = 0$ ocorre transmitância apenas para ondas *p*. Valores intermediários implicam em que a onda transmitida possui ambos os estados de polarização em proporções variáveis. Em particular, para $PCR = 0{,}5$, a onda transmitida é não polarizada, já que apresenta ambas as componentes em igual proporção.

A figura 33 mostra como varia o nível de polarização *PCR*, em função do espaçamento da rede, atestando a validade da relação 3.5-3. O parâmetro de

espaçamento entre linhas, Λ, deve apresentar valores da ordem de micrômetros pois no trabalho de Bomzon et al. (2001) foi utilizado $\lambda = 10{,}6$ μm (LASER de CO_2) e $n_S = 3{,}27$ para GaAs ou $n_S = 2{,}4$ para ZnSe.

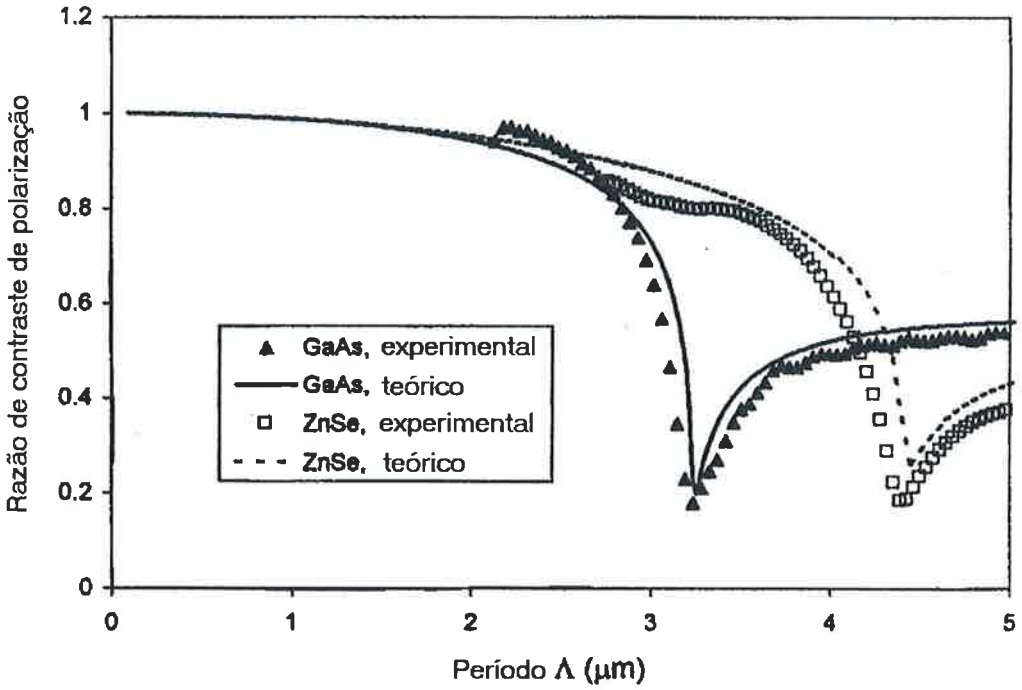


Fig. 33: Razão de contraste de polarização em função do período da rede (BOMZON et al., 2001).

O método mais simples de se obter uma rede como a da figura 32 é simplesmente depositando-se uma camada de metal sobre um substrato adequado e daí procedendo-se à sua litografia.

O problema com essa abordagem é a sua impraticabilidade para comprimentos de onda na região do visível, por motivos tecnológicos. Assim, se usarmos o Si como substrato, $n = 3{,}5$ e fizermos $\lambda = 550$ nm (na metade do espectro visível), então o espaçamento entre as linhas condutoras deveria ser bem menor do que 157 nm. Escolhendo-se um fator de 5x, por exemplo, então o espaçamento entre as linhas de metal deveria ser de aproximadamente 0,03 μm, o que demanda equipamento muito sofisticado no âmbito da tecnologia microeletrônica atual.

Uma outra possibilidade é implementar tais linhas não com metais mas com polímeros cujas cadeias moleculares estejam alinhadas paralelamente e às quais se

fixem íons condutores, tal como reportado por Kalayjian et al. (1999) (veja capítulo anterior).

Filtros polarizadores como os descritos acima, são normalmente utilizados na área de fotografia para a diminuição de reflexos indesejáveis. Por outro lado, no presente trabalho, este tipo de filtro polarizador foi por nós utilizado na implementação de um sistema empregando duas câmeras CCD para a obtenção de imagens de diferença de polarização em tempo real conforme será mostrado no item 7.1. No capítulo 4, será descrito um outro tipo de filtro polarizador baseado em cavidade de ressonância de Fabry-Perot (também implementado no presente trabalho), compatível com a tecnologia de microeletrônica, visando a implementação de microssistemas PDI integrados.

4 – SIMULAÇÕES

Apresentaremos neste capítulo os resultados das simulações de filtros de interferência de Fabry-Perot de faixa muito estreita com característica polarizadora, através do *software* Matlab® 6.5 da *MathWorks*™.

Todos os arquivos de *script* (*m-files*) utilizados nestas simulações foram implementados a partir do *Toolbox* de simulação para filmes finos birrefringentes, que acompanha o livro "*Birefringent thin-films and polarizing elements*" (Hodgkinson et al, 1997). Portanto, toda a matemática empregada para o desenvolvimento das ferramentas de simulação, ora utilizadas, pode ser melhor compreendida recorrendo-se à referência supracitada e, também, consultando o Apêndice III.

O objetivo destas simulações iniciais foi o de obter um filtro de interferência que apresentasse ao mesmo tempo uma estreita faixa de passagem centrada num comprimento de onda na região do visível (550 nm) e que ao mesmo tempo apresentasse uma grande rejeição para uma das componentes de polarização da luz, ou seja, que permitisse a passagem da luz majoritariamente em um estado de polarização.

A motivação para isso já foi devidamente explicada quando nos reportamos ao esquema para obtenção de PDI's (imagens de diferença de polarização) no capítulo 3 deste trabalho. Isto posto, as estruturas escolhidas para serem simuladas foram as seguintes:

1. Filtro polarizador Fabry-Perot de cavidade simples (FPd);
2. Filtro polarizador Fabry-Perot de cavidade dupla (FP2d);
3. Filtro Fabry-Perot com filmes de metal (FPm);
4. Filtro polarizador Fabry-Perot com filmes de metal e cavidade dupla (FP2m);

Os materiais para os quais as simulações foram efetuadas são: o dióxido de titânio, TiO_2, depositado em ângulo para servir como material birrefringente, prata (Ag), e alumínio (Al), nos filtros que requerem filmes metálicos. As secções

seguintes apresentam simulações preliminares para a determinação dos parâmetros ópticos dos materiais acima referenciados.

4.1 Simulações de filmes metálicos

Os metais são caracterizados por possuírem índice de refração complexo, o que implica em dizer que os mesmos apresentam perdas na intensidade da luz refletida e/ou transmitida devido à absorção da mesma (Abelès, 1971).

As figuras 34 e 35 apresentam a variação das partes, real e imaginária, do índice de refração para o alumínio e para a prata.

Com os valores do índice de refração para esses metais, podemos então plotar os gráficos da variação da transmitância (T), reflectância (R) e absorbância (A) em função da espessura e do comprimento de onda. O meio de incidência é o ar e consideramos filmes depositados sobre substratos de vidro com índice de refração igual a 1,5.

Como podemos ver pelos gráficos das figuras 36 e 37, a prata apresenta uma maior transmitância em relação ao alumínio para uma dada espessura. Tal característica é bastante interessante para a implementação de filtros do tipo Fabry-Perot (Hass et. al., 1977); (Vaughan, 1989) pois permite que obtenhamos um filme de boa transmitância numa espessura não muito pequena (dezenas de nanômetros), assegurando-se assim maior facilidade no controle da mesma. Além disso, a prata quase não apresenta absorbância, ou seja, toda a luz que não for refletida será transmitida, não havendo assim perdas apreciáveis de intensidade. Em função dessas características, o metal que melhor se adequa às nossas necessidades é a prata. Portanto, nas simulações dos filtros de interferência utilizando metais, utilizaremos sempre a prata.

Por outro lado, a prata apresenta menor reflectância na região do azul do que no vermelho, como podemos constatar pelo gráfico da figura 39. Tal característica, como veremos nas simulações para os filtros de interferência, acaba por introduzir uma assimetria no comportamento dos mesmos, mas que não afeta de modo apreciável os resultados pretendidos.

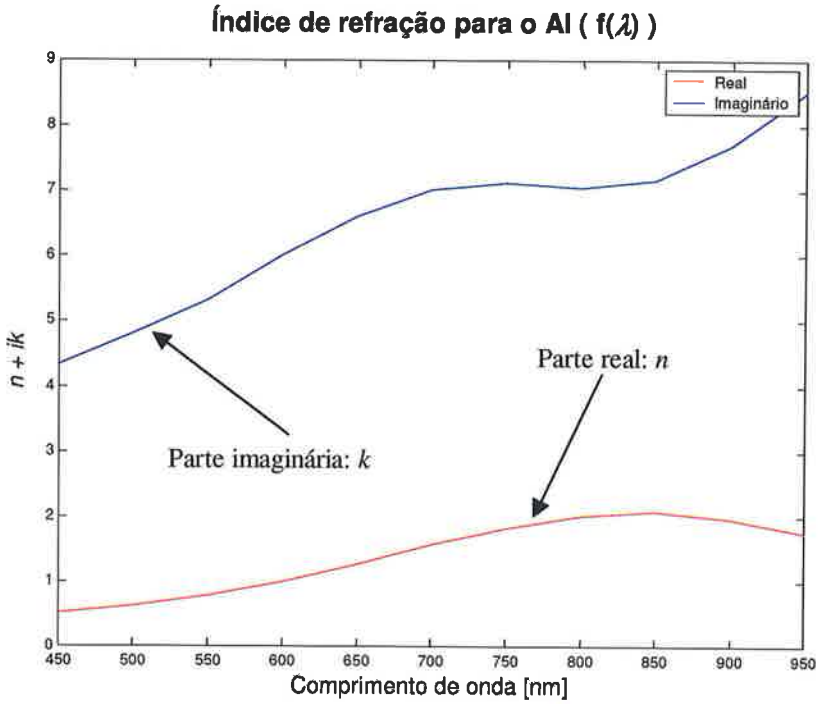


Fig. 34: Índice de refração complexo do alumínio em função do comprimento de onda.

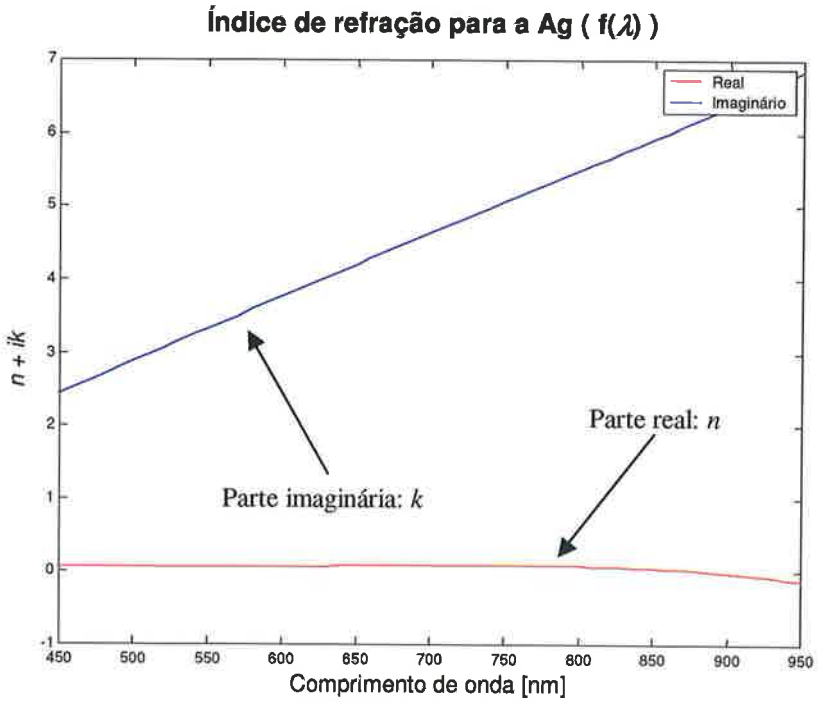


Fig. 35: Índice de refração complexo da prata em função do comprimento de onda.

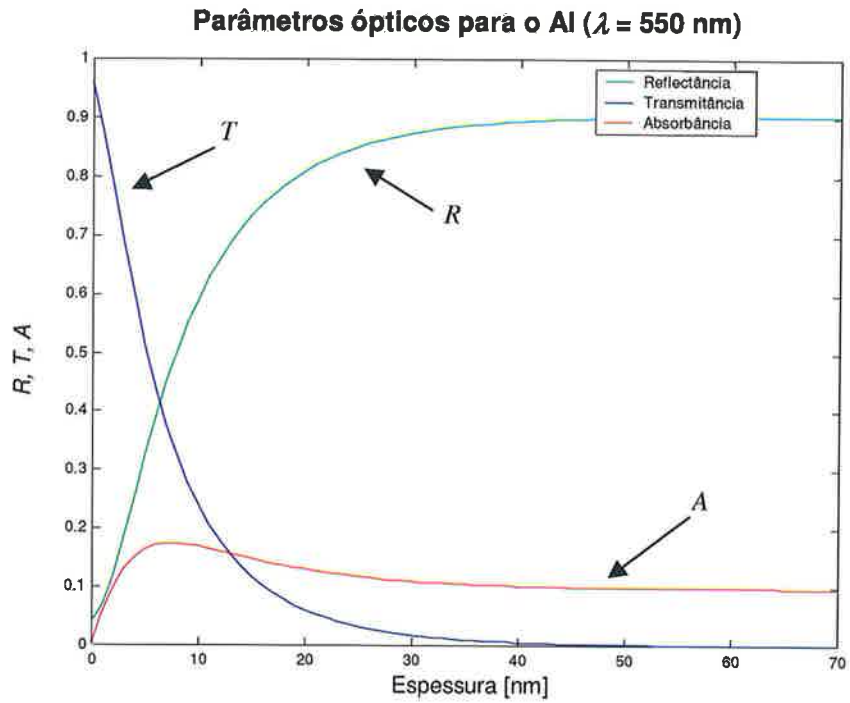


Fig. 36: Parâmetros ópticos do alumínio (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função da espessura para $\lambda = 550$ nm.

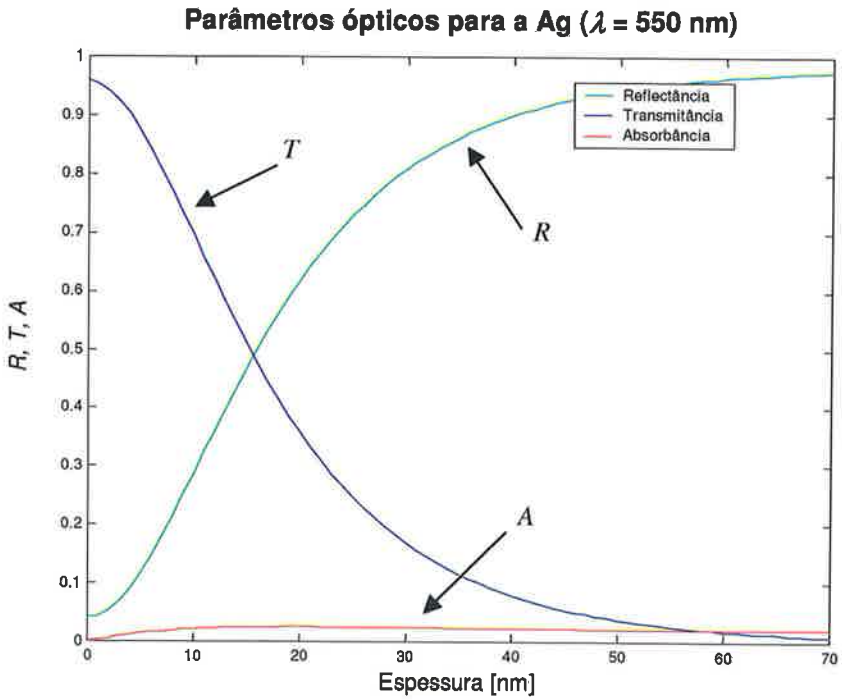


Fig. 37: Parâmetros ópticos da prata (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função da espessura para $\lambda = 550$ nm.

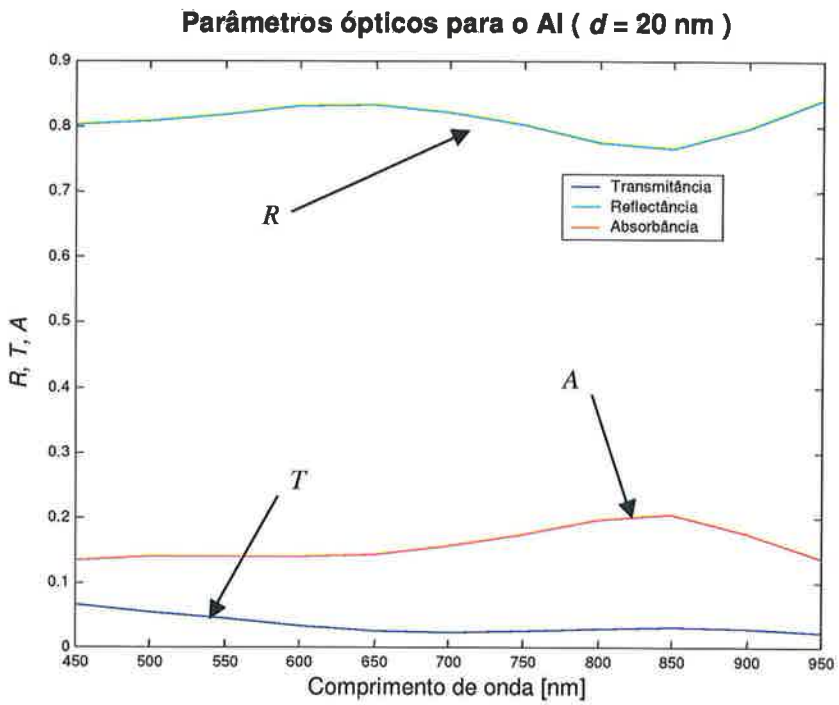


Fig. 38: Parâmetros ópticos do alumínio (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função do comprimento de onda para *d* = 20 nm.

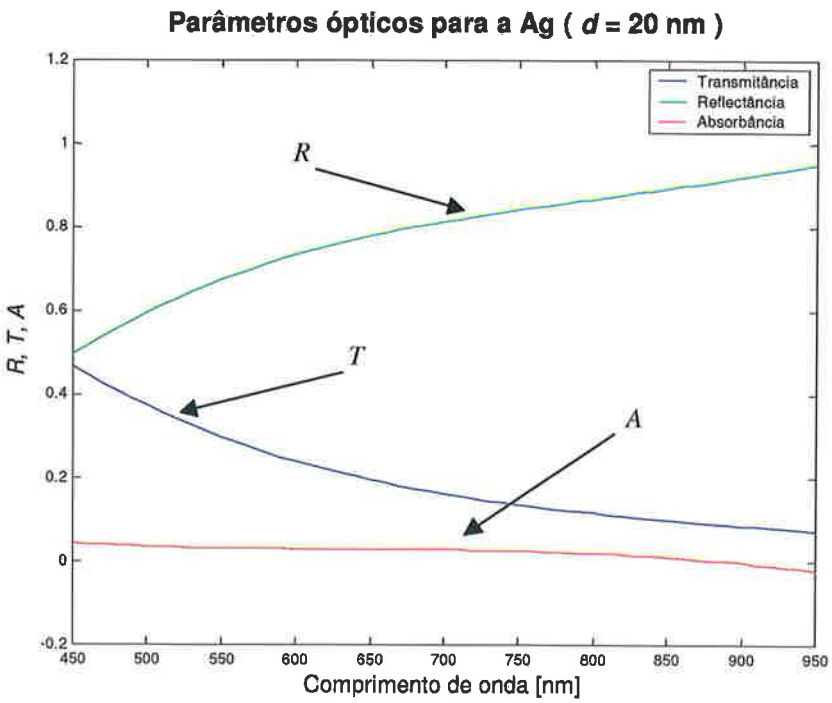


Fig. 39: Parâmetros ópticos da prata (Reflectância (R), Transmitância (T) e Absorbância (A)) em função do comprimento de onda para *d* = 20 nm.

Com isso encerramos as simulações para os filmes metálicos. Na próxima secção apresentaremos as simulações para o dióxido de titânio (TiO_2).

4.2 Simulações do TiO_2 como material birrefringente

O TiO_2 depositado por *e-beam* ou por qualquer outro processo de deposição física, de Ti em uma atmosfera residual de oxigênio, pode tanto ser empregado como material de alto índice de refração (nominalmente 2,41) quanto como material birrefringente (birrefringência de forma), com índices variando conforme se vê nas figuras 40 e 41. Para conseguirmos um ou outro comportamento, basta variarmos o ângulo sob o qual o material é depositado. Observe na figura 40 que para ângulos de deposição pequenos obtém-se índice de refração homogêneo próximo de 2,41 e para ângulos maiores, obtém-se diferença substancial entre n_1, n_2 e n_3 já definidos anteriormente no capítulo 2.

Nas simulações dos filtros de interferência que apresentaremos na próxima secção, o TiO_2 será tanto empregado como material de alto índice de refração, quanto elemento birrefringente, dependendo da necessidade da aplicação.

Por outro lado, o gráfico da figura 41 mostra os índices de refração vistos pela luz sob incidência normal para as polarizações *p* e *s*. Este gráfico é o que será empregado na determinação da birrefringência dos filmes de óxido de titânio através da diferença entre os índices de refração n_p e n_S.

O valor do ângulo de deposição para o qual a diferença entre os índices de refração é máxima na figura 41 (máxima birrefringência) é de 56,5° onde os índices $n_p = 1{,}9248$ e $n_S = 1{,}9981$ produzem $\Delta n = 0{,}0733$.

Doravante e a não ser que especificado em contrário, nas simulações vamos considerar a máxima birrefringência apresentada pelo TiO_2, de modo a obtermos a maior variação possível de resposta às componentes de luz polarizada.

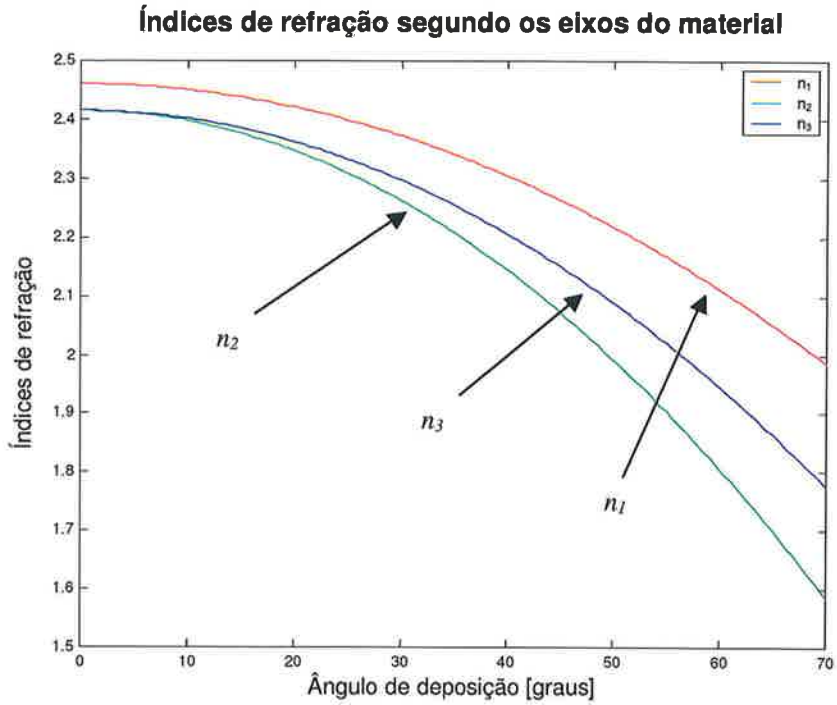


Fig. 40: Índices de refração do TiO_2 em função do ângulo de deposição (Hodgkinson et al., 1997).

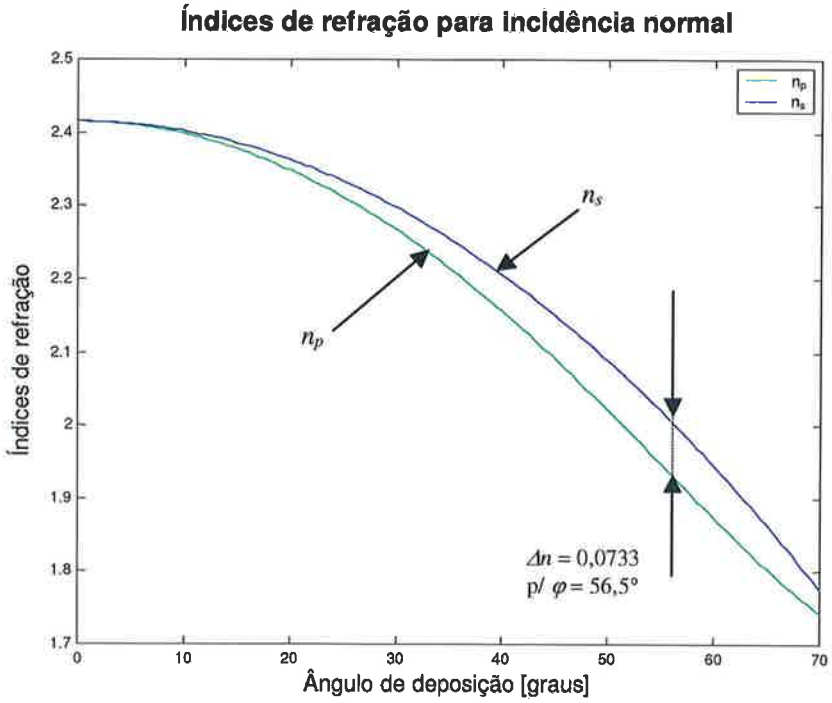


Fig. 41: Índices de refração n_p e n_s, para incidência normal, em função do ângulo de deposição.

4.3 Simulações dos filtros de interferência

Todas as simulações efetuadas foram no sentido de obter um filtro com pico de transmissão no comprimento de onda de 550 nm, que se encontra na região do verde, aproximadamente no meio do espectro visível (390 – 770 nm), e para a polarização *p* (um filtro para polarização *s* também seria possível, apenas mudando os valores de espessura das cavidades ressonantes).

O material de índice de refração alto (camada H, n = 2,41) é o TiO_2, e o material de índice baixo (camada L, n = 1,46) é o SiO_2. Nas camadas P e S, o material é o TiO_2 depositado em ângulo adequado.

Aqui se torna necessária a definição da nomenclatura a ser empregada durante as simulações. Primeiramente, a figura 42 ilustra o método de obtenção dos materiais P e S. Como já mencionado, o material a ser empregado é o TiO_2 depositado em ângulo.

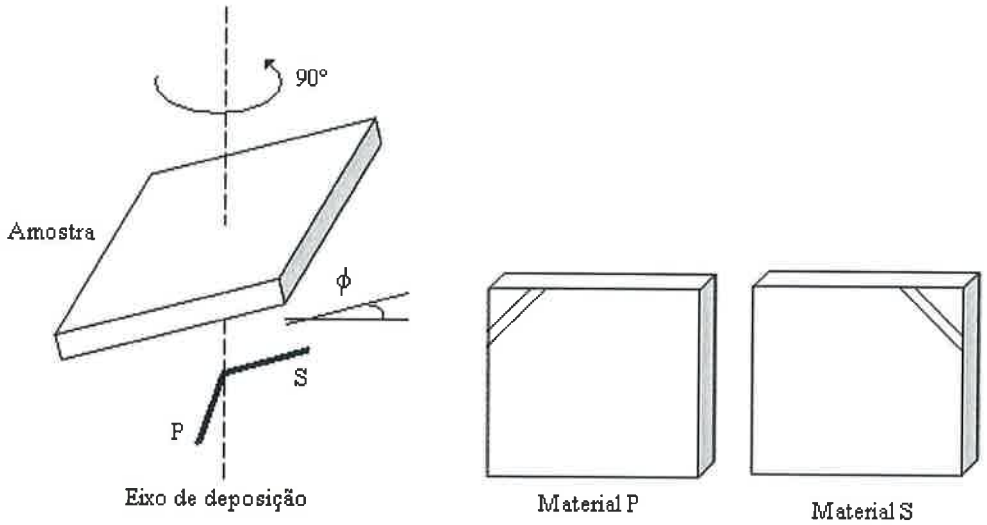


Fig. 42: Processo de obtenção dos materiais P e S.

O valor do índice de refração do material é definido pelo ângulo de deposição ϕ, que deve ser de 56,5° para se obter o maior valor de birrefringência. A diferenciação entre os materiais P e S ocorre por simples rotação de 90° no porta-amostra, como indicado na figura 42. Isso tem o efeito de comutar os índices n_p e n_s, vistos pela luz nessas duas polarizações na incidência normal.

Os materiais H e L já foram definidos acima. Resta dizer que uma camada, H, L, P ou S deve apresentar uma espessura igual a ¼ do comprimento de onda escolhido que é igual a 550 nm.

Um exemplo de estrutura simulada, utilizando-se a nomenclatura introduzida acima seria:

$$a\ H\ [L\ H]^N [P\ P]^M [H\ L]^N\ H\ g$$

onde "a" indica incidência pelo ar, "g" substrato de vidro (*glass*) e os expoentes indicam o número de repetições das estruturas entre colchetes. Uma estrutura formada por um número suficientemente elevado de camadas HL apresenta alta refletividade, ou seja, atua como um espelho. Portanto, o exemplo acima representa uma cavidade com material P cercada por duas camadas de alta refletividade. Essa estrutura é um filtro Fabry-Perot.

Ao utilizar material birrefringente na cavidade ressonante, teremos que cada componente de polarização da luz verá índices de refração ligeiramente diferentes e o efeito será o de um deslocamento do pico de transmitância máxima, conforme podemos ver na figura 43.

O resultado desta simulação nos mostra que não basta utilizarmos material birrefringente na cavidade de ressonância se o nosso intento for o de eliminar uma das componentes de polarização, pois, apesar de deslocadas, ambas as polaridades estão presentes.

O fato de este filtro apresentar dois picos de transmitância máxima para comprimentos de onda diferentes, no entanto, nos permite criar uma estratégia para a efetiva eliminação de um dos níveis de polarização.

Para isto basta que tenhamos outro filtro Fabry-Perot, associado ao primeiro, com seletividade alta o suficiente para deixar passar a componente que estiver centrada em apenas um dos comprimentos de onda de máxima transmitância.

Assim, o problema de se obter um filtro polarizador recai para o caso mais simples de se obter um filtro de alta seletividade.

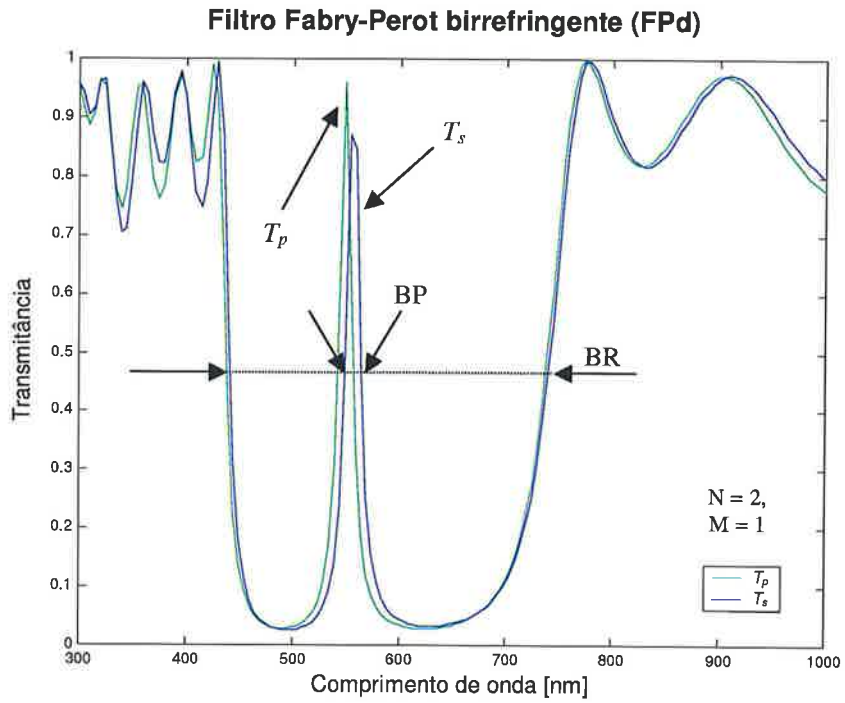


Fig. 43: Filtro Fabry-Perot (N = 2 e M = 1) com material birrefringente na cavidade.

Um filtro Fabry-Perot de duas cavidades apresenta as características necessárias de alta seletividade e funciona como se tivéssemos associado um segundo filtro àquele que já promoveu a separação, em comprimentos de onda, das duas componentes de polarização ortogonais.

Passemos então à simulação desse novo modelo apresentada na figura 44, cuja estrutura é a seguinte:

$$a\ [H\ L]^N[P\ P]^M[L\ H]^N\ C\ [H\ L]^N[S\ S]^M[L\ H]^N\ g$$
$$N = 2,\ M = 2$$

onde C é a camada espaçadora com índice de refração igual ao da camada L.

A espessura total resultante pode ser bastante grande. Tomando N=2 e M=2, obtém-se cerca de 1.865,0 nm de espessura total. Além disso, também se observa grande transmitância para comprimentos de onda dentro da região do visível (especialmente na região do azul) na forma de picos espúrios.

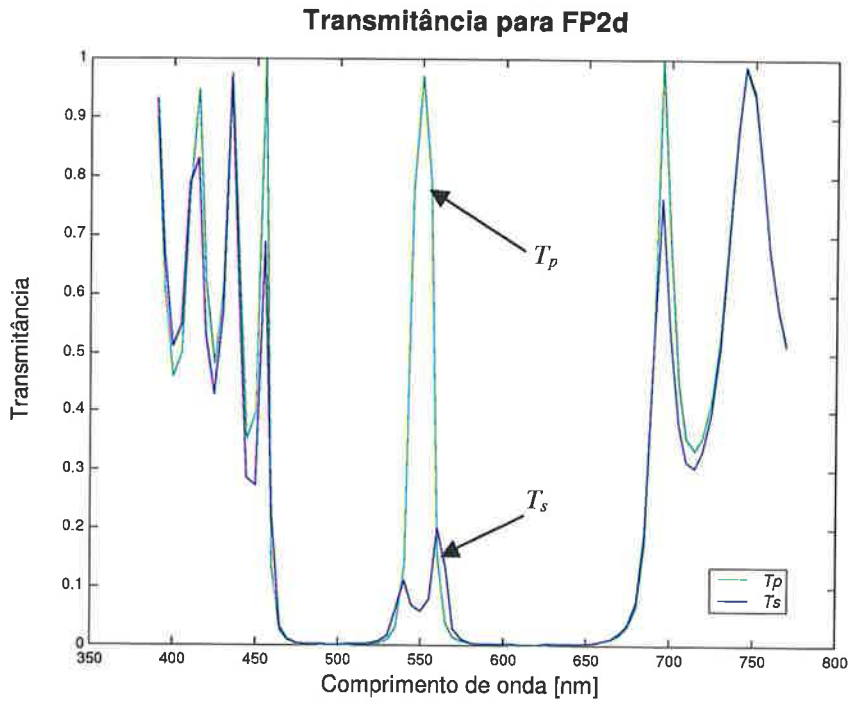


Fig. 44: Filtro polarizador Fabry-Perot de dupla cavidade.

Conseguimos assim, um efetivo cancelamento de uma das componentes de polarização, ou seja, uma estrutura Fabry-Perot de dupla cavidade pode ser efetivamente utilizada como filtro polarizador.

Entretanto, os problema acima reportados, de grande espessura e alta transmitância em outros comprimentos de onda que não o de projeto, fazem-nos procurar por outro tipo de filtro que apresente as características desejadas de polarização da luz transmitida sem apresentar os problemas associados aos filtros implementados apenas com filmes dielétricos.

Uma possibilidade é simplesmente substituir as camadas reflexivas de filmes dielétricos por outras feitas tão somente por uma camada de metal com espessura adequada.

A idéia por traz desse tipo de filtro é a mesma que para a versão com dielétricos: uma camada ressonante cercada por camadas altamente reflexivas, só que desta vez implementadas com filmes metálicos.

Filtros com filmes de metal apresentam o inconveniente de nunca transmitirem 100% da luz incidente, nem mesmo no comprimento de onda de

projeto, pois o metal acaba absorvendo uma parte da luz incidente. Daí o motivo para que tais filmes sejam o mais finos possível e mesmo assim, uma transmitância de 50% pode até ser considerada razoável.

Além disso, não há transmitância além da associada à banda-passante que é cerca de 20 nm em torno do comprimento de onda de projeto (550 nm), característica essa bastante desejada.

Passemos a um exemplo de filtro Fabry-Perot de apenas uma cavidade implementada com material birrefringente.

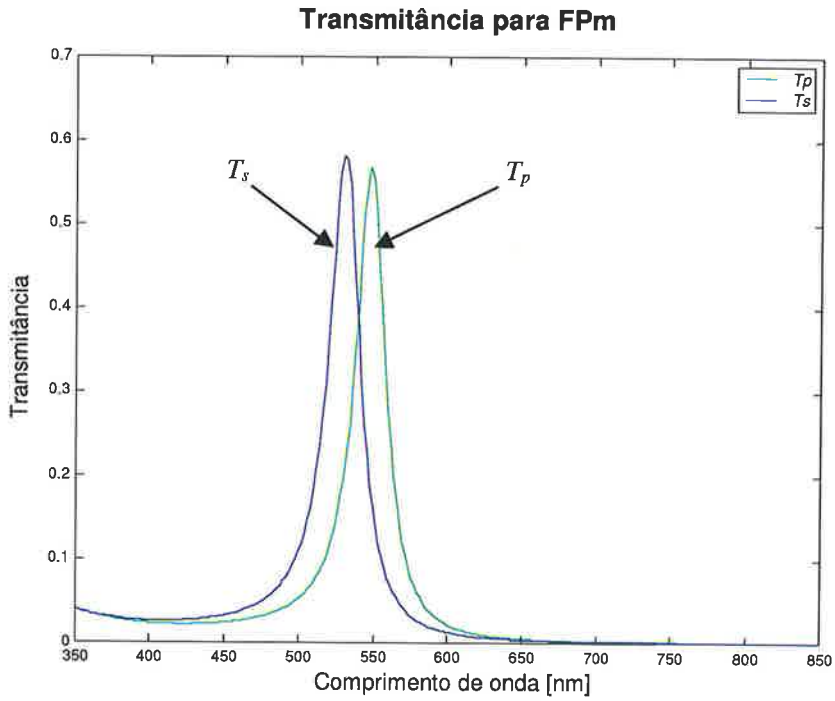


Fig. 45: Filtro Fabry-Perot com cavidade birrefringente.

Percebemos na figura 45 que há uma pequena transmitância na região do azul que é devida, como já mencionado anteriormente, à maior transmitância do filme de prata nessa região em relação ao vermelho (figura 39).

Para eliminarmos a componente de polarização indesejada, podemos recorrer ao mesmo esquema já utilizado antes, ou seja, implementar dois filtros, um sobre o outro, de modo a obtermos um filtro Fabry-Perot de cavidade dupla.

Novamente, o fato de implementarmos uma cavidade dupla permite a eliminação da componente indesejada, tornando o filtro passa-faixa um filtro polarizador.

O filtro simulado na figura 46 apresenta transmitância de pico de 52,67% e rejeição em relação à componente *s* de 12,19, mais do que uma ordem de grandeza, o que é um valor bastante bom.

A faixa de passagem medida a meia altura é de 16 nm em torno do comprimento de onda de projeto (550 nm) e a única inconveniência é a presença de um pico espúrio centrado em ~370 nm, pico esse aliás, maior do que o próprio pico de projeto.

A presença do pico de 370 nm se deve à grande espessura da cavidade, o que faz surgir resultados espúrios da mesma forma que o aumento da cavidade o fazia no equivalente para dielétricos.

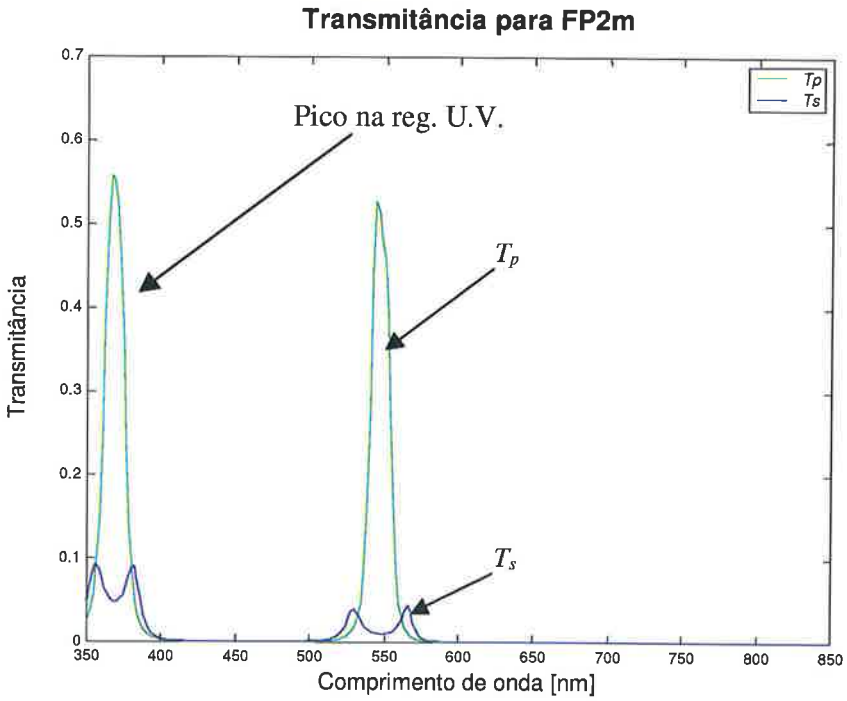


Fig. 46: Filtro polarizador de banda estreita.

A espessura total do filtro é de 599 nm, que é composta da seguinte forma: [35 nm Ag / 225,2 nm S / 70 nm Ag / 233,8 nm P / 35 nm Ag], onde P e S são as

cavidades birrefringentes implementadas com TiO_2 depositado a 56,5° para se ter máxima birrefringência Δn = 0,0733 (Hodgkinson et al., 1997).

A presença do pico de transmitância de 370 nm não é importante pois está posicionado fora da faixa do visível (390 – 770 nm) na região do ultravioleta, local do espectro para o qual sensores de Si, por exemplo, não apresentam um bom rendimento.

Supondo-se que venhamos a utilizar, como detector, um diodo implementado em silício, a foto-corrente gerada como resultado da absorção do ultravioleta pelo mesmo será bastante pequena já que nessa região do espectro, o coeficiente de absorção (α) do Si é tão grande (veja Apêndice II) que os portadores são gerados numa região muito pequena logo abaixo da superfície, onde as perdas por recombinação promovidas por defeitos estruturais são potencialmente grandes, especialmente se a junção do diodo não for muito rasa.

4.4 Conclusões sobre a etapa de simulações iniciais

Da forma como foi estruturado, o presente capítulo pode ser dividido em três partes a saber: simulações sobre o comportamento de filmes finos metálicos e birrefringentes (4.1 e 4.2), simulações do comportamento de filtros de interferência apenas com filmes dielétricos e simulações de filtros de interferência com filmes metálicos (4.3).

A primeira parte serviu para nos fornecer informações tais como: qual o filme de metal que melhor atende às necessidades desse trabalho; assimetrias de comportamento ao longo do espectro, principalmente na região do visível; e espessuras para as quais há uma boa porcentagem de luz transmitida.

A partir dos resultados dessa primeira parte, concluímos que a prata, apesar de apresentar uma assimetria de transmitância entre as regiões do azul e do vermelho, é a mais indicada por apresentar boa transmitância e quase nenhuma perda, o que nos permite implementar filmes de espessura razoável evitando-se problemas de controle de sua deposição.

Das simulações com TiO_2, mostramos que o ângulo de deposição ideal é de 56,5° para equipamentos de *e-beam*, pois é onde há a maior diferença entre os índices de refração vistos pela luz em incidência normal, e portanto, maior birrefringência e conseqüentemente implica em maior diferenciação de comportamento para componentes de polarização *p* e *s*.

Na segunda parte, sobre filtros de interferência com dielétricos, vimos que é possível obter-se filtros de características adequadas em se tratando de rejeição à componente *s* e largura de banda-passante no filtro tipo Fabry-Perot de duas cavidades (FP2d). Mas, a implementação de tal filtro é bastante complicada dada a grande espessura final do mesmo, o que traria problemas de tensão mecânica (*stress*) e de aderência entre os múltiplos filmes empregados. Além disso, não é possível eliminar picos espúrios dentro da faixa do visível, o que acaba por comprometer os resultados pretendidos.

Por outro lado, ao substituirmos as camadas dielétricas de alta reflexividade por filmes de metal (Ag), podemos eliminar os problemas acima delineados e manter as características desejadas, mas às custas de uma menor transmitância máxima (maior perda de inserção).

O que nos leva à conclusão final para essa etapa de simulações: o filtro ideal que apresenta estreita banda-passante e grande rejeição à componente *s* sem a presença de picos espúrios na região do visível e para uma espessura total compatível com implementação em circuitos integrados CMOS é um filtro do tipo Fabry-Perot de dupla cavidade com filmes de prata, conforme visto no gráfico da figura 46.

Tab. 3: Comparação entre os diferentes tipos de filtros polarizadores.

Filtro	*BP* [nm]	*BR* [nm]	T_{pico} [%]	*RCs*	Espessura [nm]
FPd	15	300	96,00	1,10	863,5
FP2d	17	220	96,98	4,83	1.865,0
FPm	24	∞	56,68	0,98	167,0
FP2m	16	∞	52,67	12,19	599,0

A tabela 3 faz uma comparação entre os diversos tipos de filtro simulados, ilustrando o que acabamos de comentar enquanto a tabela 4 nos mostra a estrutura e espessura total dos mesmos.

Na tabela 3, *BP* (faixa de passagem) e *BR* (faixa de rejeição) têm o mesmo significado que o atribuído a eles na figura 43, T_{pico} é a transmitância de pico e *RCs* é a rejeição à componente *s*. *BP*, *BR* e T_{pico} estão especificados para a componente *p*.

Tab. 4: Estrutura dos filtros simulados.

Filtro	Estrutura	Espessura [nm]
FPd	a H $[L\ H]^N[P\ P]^M[H\ L]^N$ H g N = 2, M = 1	863,5
FP2d	a $[H\ L]^N[P\ P]^M[L\ H]^N$ C $[H\ L]^N[S\ S]^M[L\ H]^N$ g N = 2, M = 2	1.865,0
FPm	a [40 nm Ag / 87 nm S / 40 nm Ag] g	167,0
FP2m	a [35 nm Ag / 225,2 nm S / 70 nm Ag / 233,8 nm P / 35 nm Ag] g	599,0

5 – PROJETO DOS FILTROS DE INTERFERÊNCIA

Os filtros de interferência projetados nesse trabalho devem apresentar transmitância máxima para comprimento de onda entre 500 e 550 nm, dentro da região verde do espectro eletromagnético, pois, como se pode ver na figura 47, nessa região o espectro solar, bem como o das principais fontes de iluminação artificial, apresenta valores elevados quanto à sua distribuição de energia.

Associado a isso, também podemos ver, pela figura 48, que o Si, comumente empregado como sensor, apresenta uma janela de absorção centrada nessa parte do espectro eletromagnético. Isso se deve ao fato de que, para comprimentos de onda maiores, os fótons incidentes não têm energia suficiente para promoverem portadores da faixa de valência para a de condução através da faixa proibida do semicondutor. E, para comprimentos de onda menores, a absorção da luz ocorre em regiões muito superficiais, onde os portadores podem se perder por recombinação antes de chegarem à região de depleção e serem aceleradas para o outro lado da junção, fazendo assim, parte da corrente foto-gerada. Tal comportamento é melhor explicado no Apêndice II.

Assim, a decisão quanto ao comprimento de onda de passagem dos filtros projetados foi tal que permitisse a minimização da perda de inserção associada ao próprio filtro. Isso, no entanto, não implica em dizer que filtros com picos de transmitância em outros comprimentos de onda não possam ser empregados, apenas terão um menor rendimento no que concerne à conversão da energia luminosa solar em potencial ou corrente elétrica, problema esse que pode não ser significativo, dependendo das características do elemento sensor.

Para o projeto dos filtros de interferência foram usados resultados obtidos por meio de simulações, *m-files*[5] executados no *software* Matlab® 5.3 da *MathWorks*™ e empregando-se o Toolbox específico fornecido juntamente com o livro "*Birefringent thin-films and polarizing elements*" de Hodgkinson et al. (1997).

Os dados usados nas simulações foram extraídos durante o processo de caracterização dos filmes de TiO_x, os quais estão detalhados no capítulo 7.

---

[5] Arquivos de *script*.

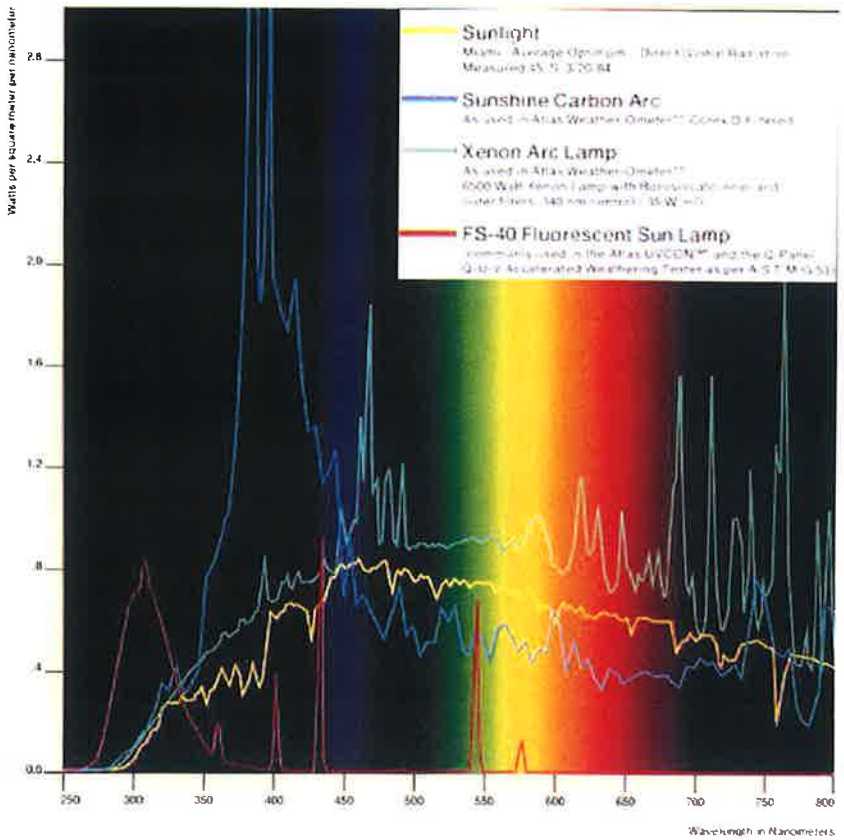


Fig. 47: Distribuição espectral da luz das principais fontes de iluminação (veja legenda). Fonte: página da internet. Endereço eletrônico http://www.atlaswsg.com/spd.html.

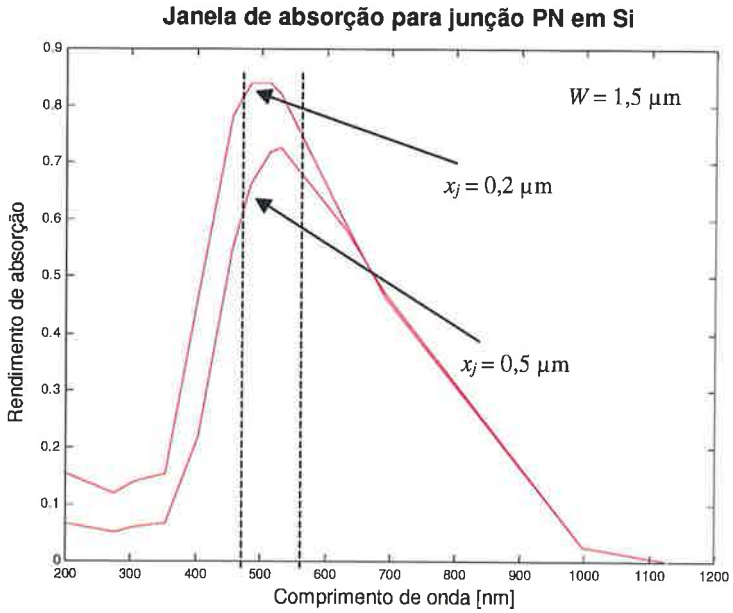


Fig. 48: Janela de absorção de luz para junções PN em silício. Veja Apêndice II.

O projeto de um filtro de interferência envolve a escolha dos índices de refração e espessuras dos filmes metálicos e de TiO_x. Os índices de refração foram obtidos experimentalmente para filmes finos de TiO_x e depois interpolados para os valores de espessura ora requeridos. Isso implica em que não podemos saber, *a priori*, se um determinado valor de índice de refração usado para o projeto será aquele realmente conseguido na fase de implementação. São esperadas, portanto, diferenças entre o projeto e o filtro real, diferenças essas que poderiam ser compensadas variando-se as espessuras das cavidades de ressonância já que índice de refração e espessura juntos definem o comprimento do caminho óptico, exercendo pois efeitos semelhantes que se refletem no posicionamento do pico de transmitância máxima do filtro.

A tabela 5 apresenta as características dos filtros projetados, cujos espectros de transmitância são exibidos nas figuras 49, 50, 51, 52, 53 e 54. A simbologia empregada nesta tabela já foi definida no capítulo 4.

Trata-se aqui de um pré-projeto utilizando-se os valores de índice de refração já levantados para filmes específicos de TiO_x. Esse pré-projeto nos fornece a espessura certa para se posicionar o pico de transmitância próximo ao comprimento de onda desejado para uma dada faixa de valores do índice de refração dos filmes de TiO_x.

Podemos reparar a partir dos espectros de transmitância e dos valores de rejeição à outra componente de polarização (coluna *RC* na tabela 5), que os filtros ora projetados são incapazes de anular completamente um dos estados de polarização. O principal motivo para isso é que os valores das diferenças entre os índices de refração vistos para cada polarização não é suficientemente elevado para que possamos cancelar uma das componentes sem necessitarmos de uma altíssima seletividade do filtro. Por isso, ainda existem componentes significativas de polarização cruzada nos espectros ora apresentados, mas os valores de rejeição chegam a ser superiores a 3 vezes. Assim, num filtro tipo *p*, essa componente é transmitida três vezes mais do que a componente *s*. Embora sem conseguir anular totalmente a componente de polarização indesejada, os filtros aqui projetados ainda são plenamente eficazes no sentido de que, ao transmitir preferencialmente uma das componentes de polarização, tal componente deixará um saldo positivo quando da

subtração das imagens e esse valor, seja ele qual for, dará origem ao sinal de PDI para um dado *pixel*, podendo inclusive, ser normalizado a partir de testes de calibração.

Tab. 5: Características dos filtros projetados para filmes específicos de TiO_x. Os índices de refração foram levantados experimentalmente neste trabalho (capítulo 7). *BP* é a faixa de passagem do filtro e *RC* é a rejeição à componente de polarização ortogonal.

Índices de refração (550 nm)	*Tipo*	*BP* [nm]	T_{pico} [%]	*RC*	λ_{pico} [nm]	Estrutura [nm]
2,47623 2,44847	P	12,0	0,4018	3,0625	512	a [40 Ag / 164 S / 80,4 Ag / 160 P / 40 Ag] g
	S	14,0	0,3239	3,3664	512	a [40 Ag / 160 S / 80,4 Ag / 164 P / 40 Ag] g
2,42793 2,39775	P	11,6	0,4115	3,0414	504	a [40 Ag / 164 S / 80,4 Ag / 160 P / 40 Ag] g
	S	12,0	0,4123	3,3358	504	a [40 Ag / 160 S / 80,4 Ag / 163 P / 40 Ag] g
2,05048 2,07598	P	22,0	0,3035	2,5569	576	a [40 Ag / 90 S / 80,4 Ag / 93 P / 40 Ag] g
	S	23,0	0,3022	2,2435	576	a [40 Ag / 94 S / 80,4 Ag / 90 P / 40 Ag] g

Um detalhe óbvio é a superioridade dos filtros projetados, tanto *p* quanto *s*, referentes às duas primeiras linhas (Filtros VA01 e VE01) com relação aos da última (Filtro VH09). Isto se dá pois os valores de Δn para as duas primeiras são maiores dos que os da última. Os valores experimentais, por nós obtidos, chegam no máximo a $\Delta n = 0{,}0413$ enquanto que no capítulo 4 foi apresentado um filtro teórico com $\Delta n = 0{,}073$, obtido para equipamento de *e-beam* e inclinação de substrato (ângulo de deposição) de 56,5°.

É possível que, com uma maior flexibilidade quanto aos ângulos de deposição nos possibilitassem obter valores maiores de Δn, mas estamos limitados às características do aparelho de *Sputtering* empregado (secção 6.2).

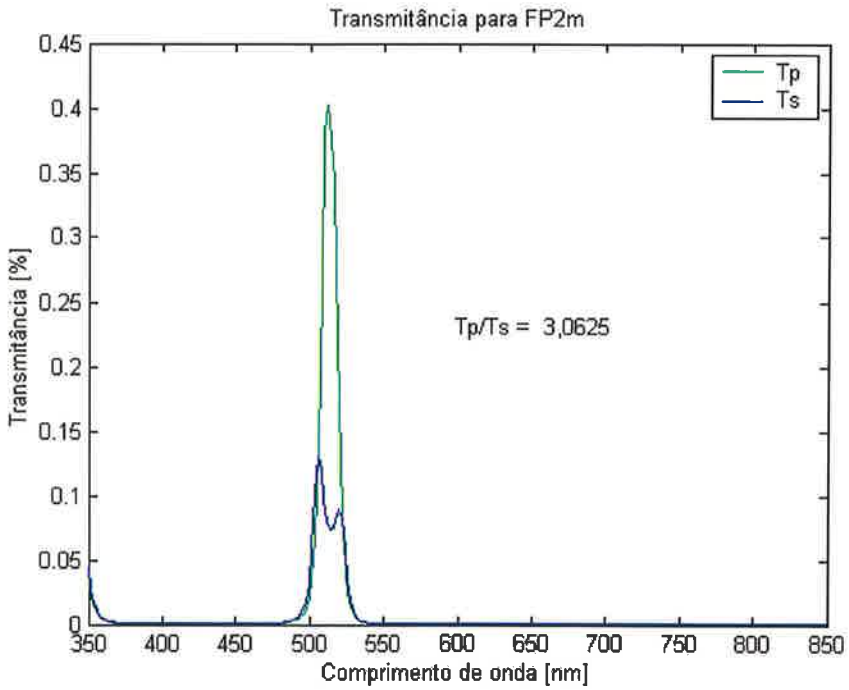


Fig. 49: Filtro VA01_P.

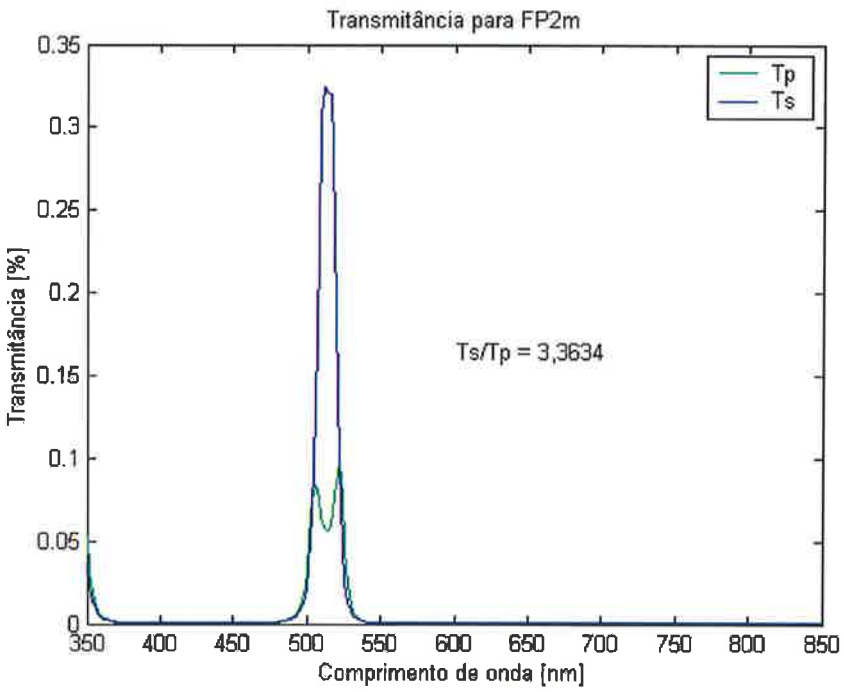


Fig. 50: Filtro VA01_S.

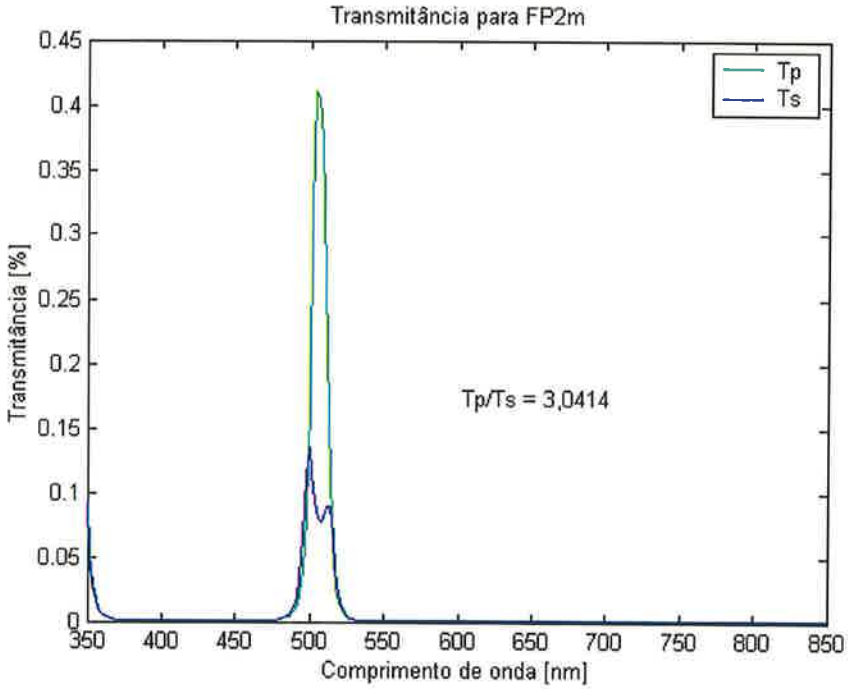


Fig. 51: Filtro VE01_P.

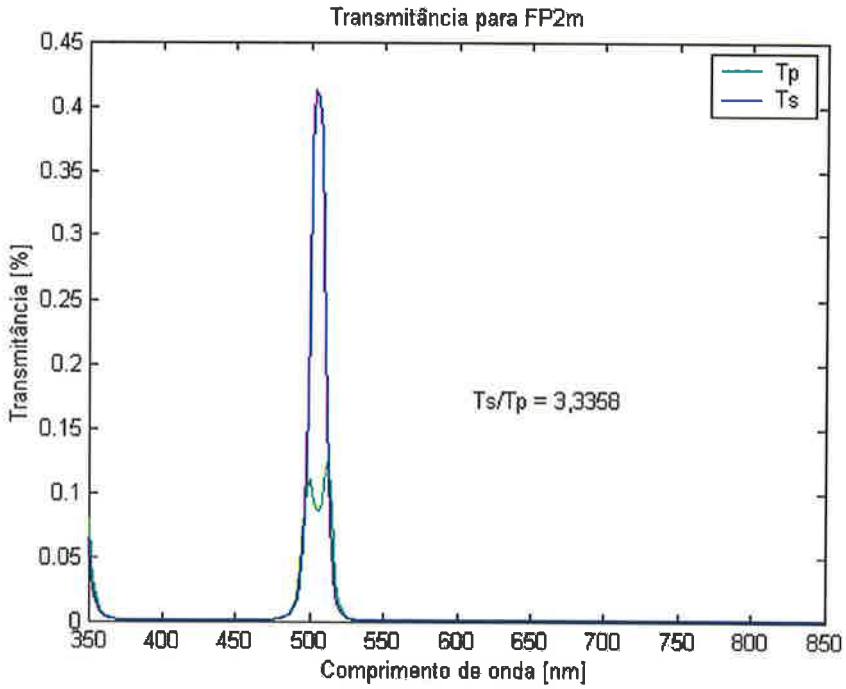


Fig. 52: Filtro VE01_S.

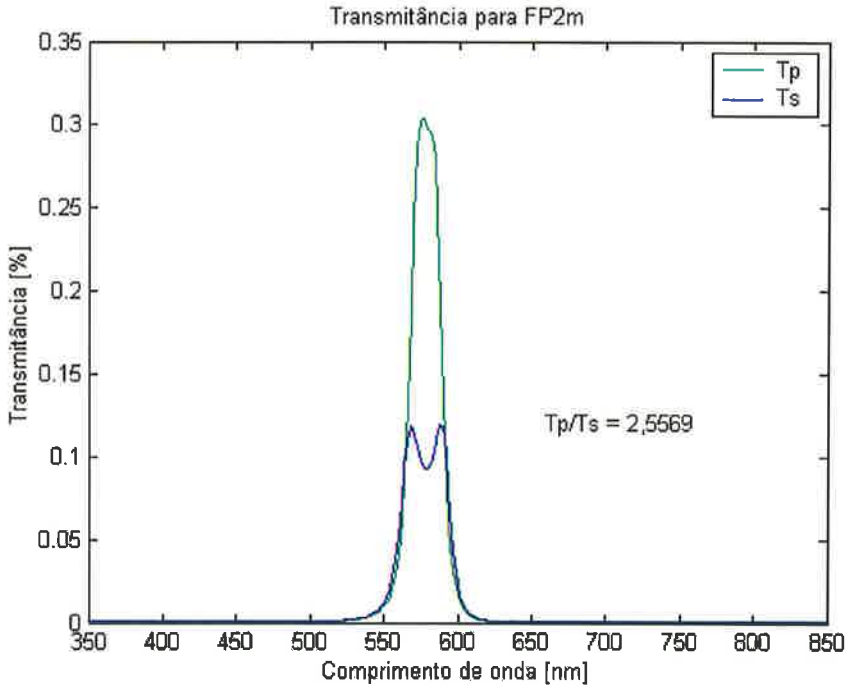


Fig. 53: Filtro VH09_P.

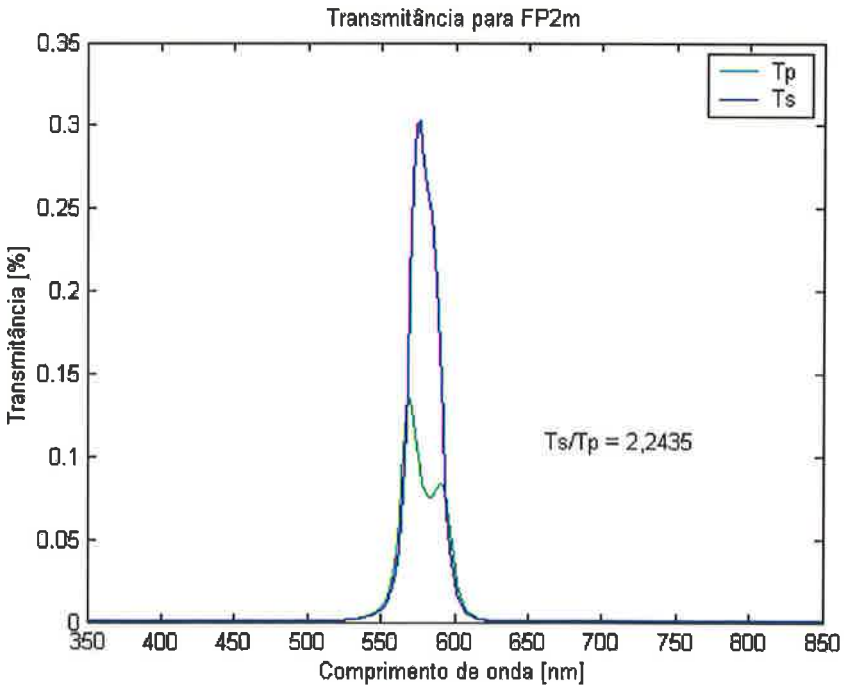


Fig. 54: Filtro VH09_S.

A partir desse pré-projeto verificamos que para valores de índice de refração próximos a 2,4 a espessura ideal é próxima a 160 – 165 nm (valores mais frequentemente associados a maiores diferenças nos índices de refração). Com isso podemos refinar o projeto do filtro de interferência determinando o índice de refração para essa espessura através da interpolação dos valores já obtidos para as espessuras de 180, 170, 150 e 120 nm (veja tabela 5).

A tabela 7 sumariza as características projetadas para esse filtro de interferência e os seus espectros de transmitância (*p* e *s*) que podem ser vistos nas figuras 55 e 56.

Tab. 6: Características refinadas do filtro de interferência.

Índices de refração (550nm)	*Tipo*	*BP* [nm]	T_{pico} [%]	*RC*	λ_{pico} [nm]	Estrutura [nm]
2,37310 2,39310	P	14,4	0,2774	2,2700	504	a [40 Ag / 164 S / 80,4 Ag / 160 P / 40 Ag] g
	S	12,5	0,3673	2,2020	498	a [40 Ag / 160 S / 80,4 Ag / 164 P / 40 Ag] g

A figura 57 ilustra um filtro teórico simulado com pico de transmitância máxima em 700 nm para duas situações, onde na primeira o coeficiente de extinção *k* é nulo, e outra onde ele é de 0,022, valor compatível com aqueles apresentados no Anexo II. Devemos reparar, a partir da figura 57, que o aumento do coeficiente de extinção não desloca o pico de transmitância máxima, mas afeta consideravelmente o valor dessa transmitância e também afeta a relação entre as intensidades para cada um dos graus de polarização, diminuindo a sua diferença.

Por outro lado, não só a espessura da cavidade de ressonância, mas também o(s) seu(s) índice(s) de refração afetam o posicionamento dos mesmos. Com isso, dependendo do valor do índice de refração, ou da espessura da cavidade de ressonância ocorre mudança no valor de comprimento de onda em que o filtro fica centrado.

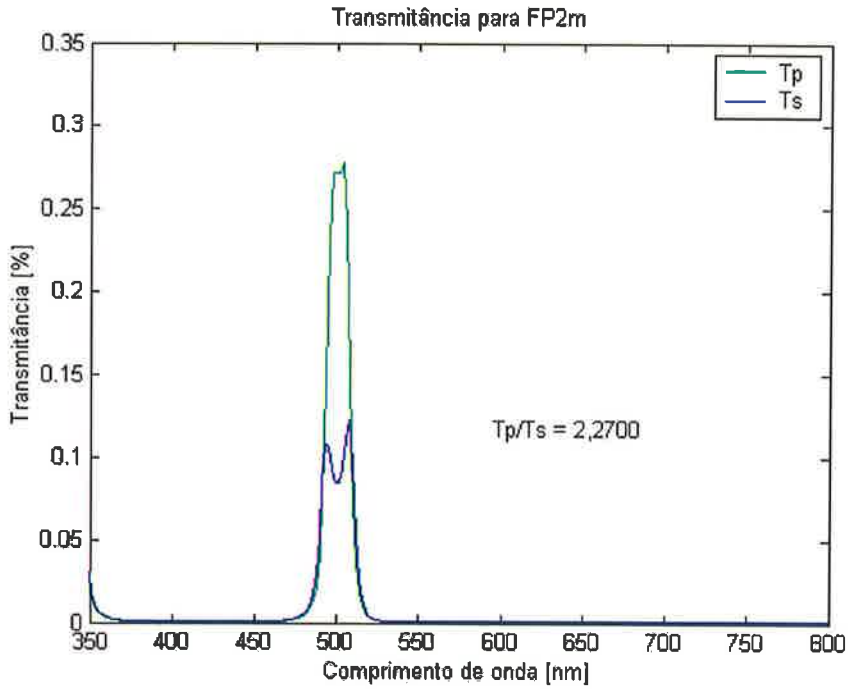


Fig. 55: Filtro P refinado para valores de espessura de cavidade no range 160 – 165 nm.

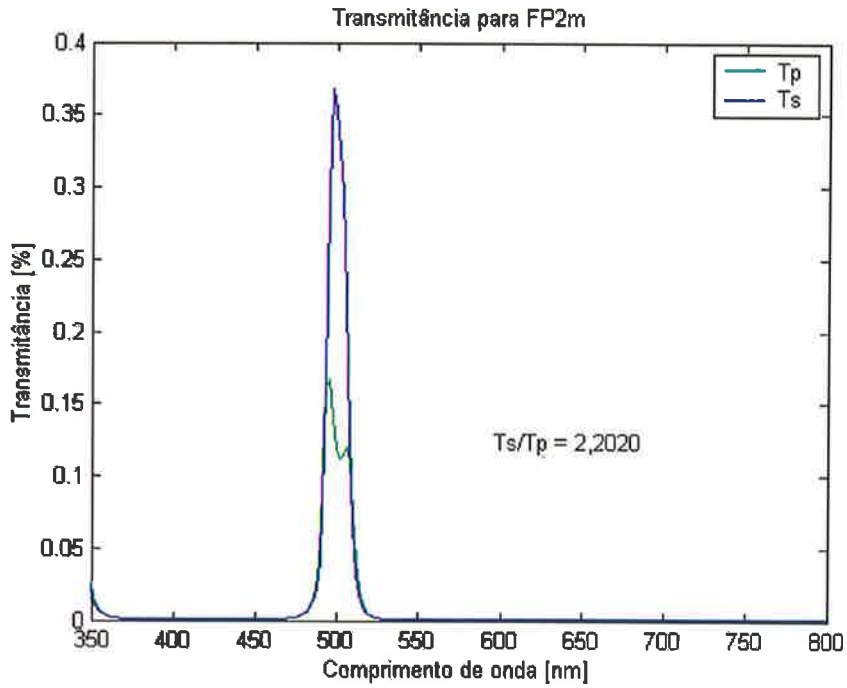


Fig. 56: Filtro S refinado para valores de espessura de cavidade no range 160 – 165 nm.

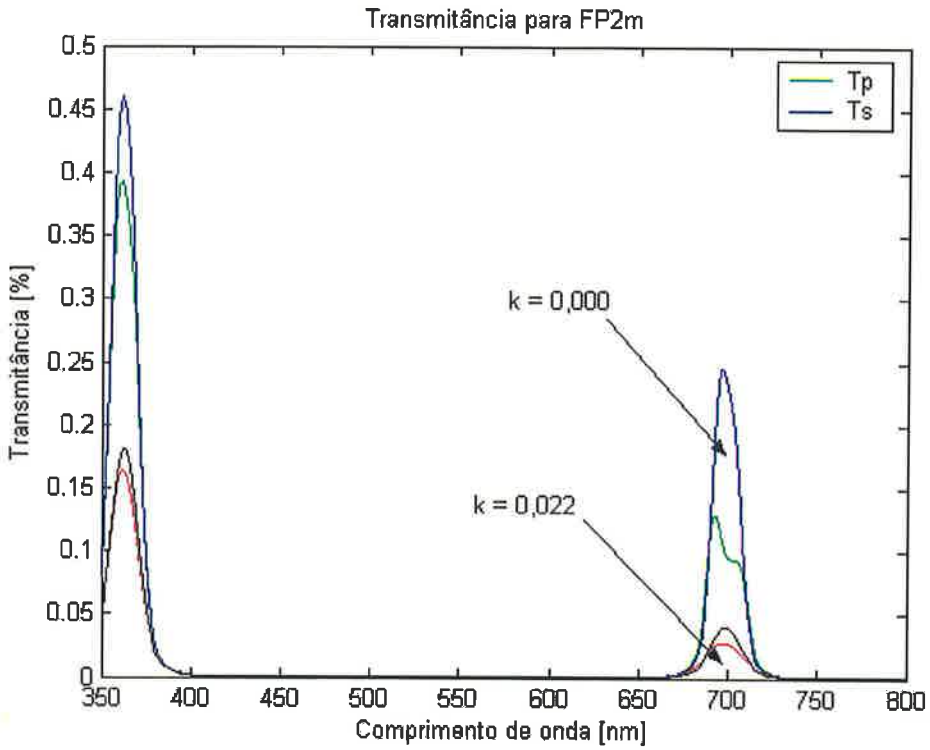


Fig. 57: Simulação para filtro com transmitância máxima em 700 nm e k nulo ou de 0,022.

A partir dos resultados anteriores de projeto, foram implementados filtros polarizadores de Fabry-Perot centrados em torno de 500 e 700 nm.

6 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS: OBTENÇÃO DE FILMES DE TiO_x E IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS POLARIZADORES

O presente capítulo pretende apresentar os procedimentos empregados para a obtenção de amostras de filmes de TiO_x sobre substratos de vidro, bem como a metodologia empregada para a implementação de filtros polarizadores.

6.1 – Obtenção de filmes de TiO_x por DC Sputtering

Da mesma forma que a técnica de *electron-beam* descrita no capítulo 2, também a deposição por *Sputtering* é um processo físico onde o titânio arrancado fisicamente do alvo por plasma se combina quimicamente com o oxigênio residual inserido na câmara de processo e o produto da reação é que será depositado na forma de TiO_x conforme será constatado a partir das caracterizações físicas (item 7.2).

A figura 58 ilustra esquematicamente o processo de deposição de TiO_x por meio de *Sputtering* D.C. disponibilizado pelo LME-EPUSP e que foi empregado neste trabalho.

No *Sputtering* D.C. o plasma é gerado por uma diferença de potencial elevada o suficiente para ionizar o gás de trabalho, geralmente o argônio. O plasma ataca então o alvo liberando átomos de Ti que reagem com o oxigênio da atmosfera da câmara formando o TiO_x que será depositado sobre as amostras presas no planetário. Dependendo da posição em que a amostra se encontra fixada, ela irá "enxergar" o alvo sob um determinado ângulo, medido entre a normal local e o centro do alvo, desde que, é claro, não haja rotação do porta-amostras. É por meio desta inclinação, tal qual no processo de *e-beam* reportado no capítulo 2, que se obteve filmes de TiO_x com um comportamento birrefringente.

Na figura 61 vemos a disposição das amostras no porta-amostras e os seus ângulos de visada mostrados na figura 60. É importante destacar que a figura 59 é

uma representação esquemática, em escala, do equipamento disponível no LME, sendo a figura 60 apenas um detalhe da mesma.

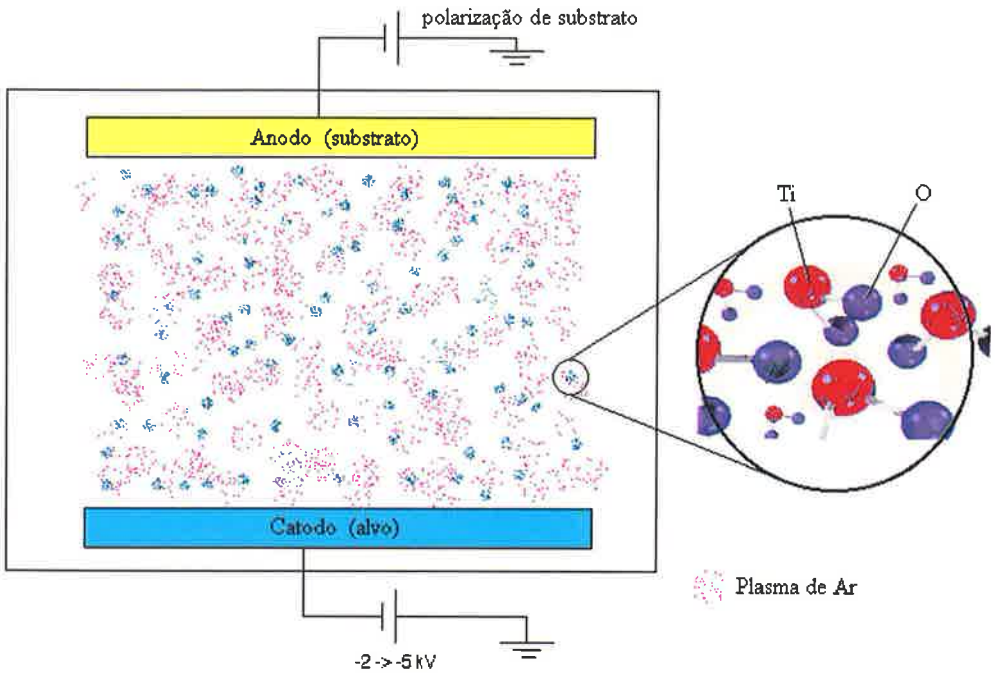


Fig. 58: Processo de deposição de TiO_x por *Sputtering* D.C.

Dos parâmetros da tabela 8, a taxa de deposição é função das correntes de *Sputtering* e de arco (em destaque). A corrente de *Sputtering* deve ser mantida constante para que a taxa de deposição também o seja.

Devido à sua influência sobre o livre caminho médio das moléculas a serem depositadas, a pressão de processo também deve ser mantida constante, como se vê na tabela.

Devido a restrições de segurança do equipamento (evitar sobre-aquecimento) todas as deposições foram efetuadas em etapas de no máximo 60 nm durante 15 min. Assim, para a deposição de 180 nm, foram efetuadas 3 etapas de 15 min, depositando-se 60 nm de cada vez com intervalo suficiente para esfriar o equipamento. A deposição de 90 nm foi efetuada numa etapa-base de 60 nm por 15

min, mais uma etapa com metade do tempo da anterior. E assim por diante, conforme os dados da tabela 8.

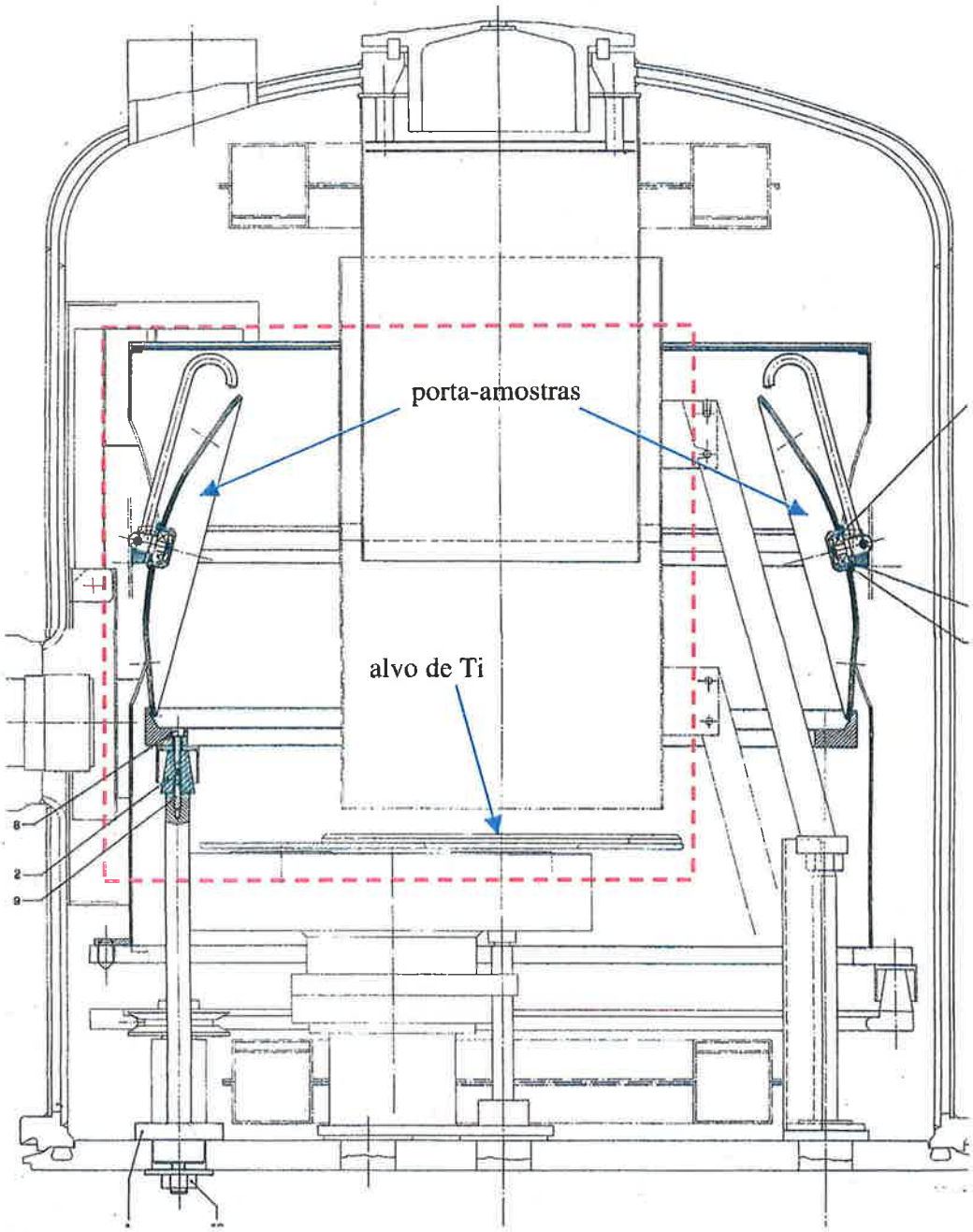


Fig. 59: Vista transversal do equipamento de *Sputtering* empregado. Em detalhe um dos porta-amostras e o alvo.

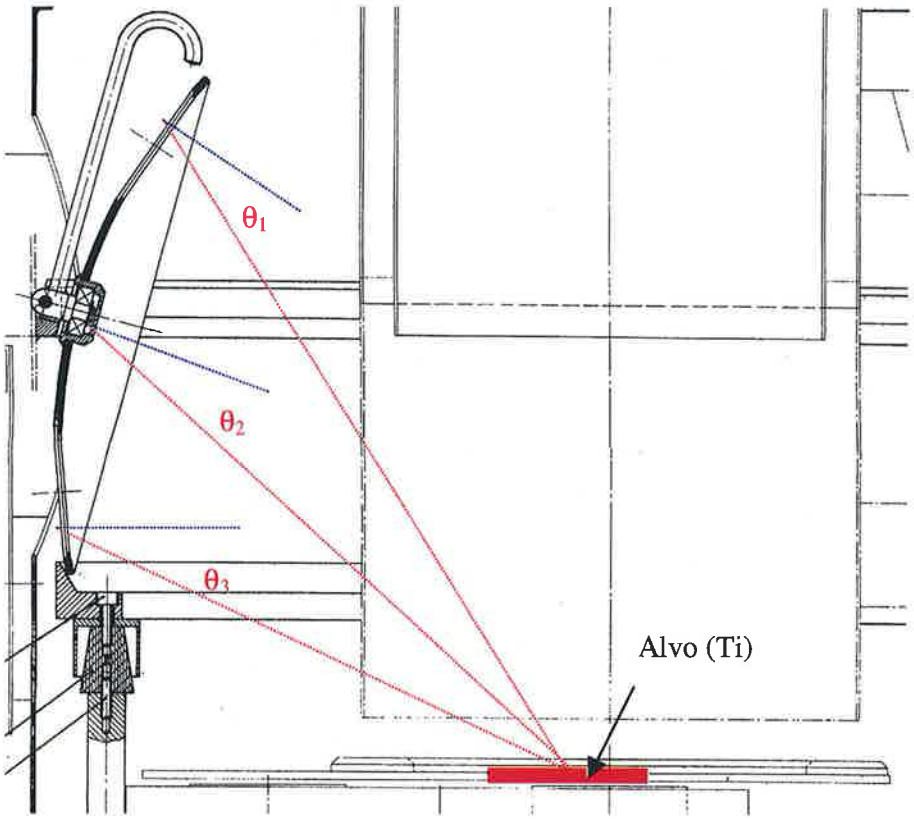


Fig. 60: Ângulos de visada, em cada região do porta-amostras, em relação ao alvo de Ti, onde θ_1 = 21,0°, θ_2 = 28,0° e θ_3 = 32,5°.

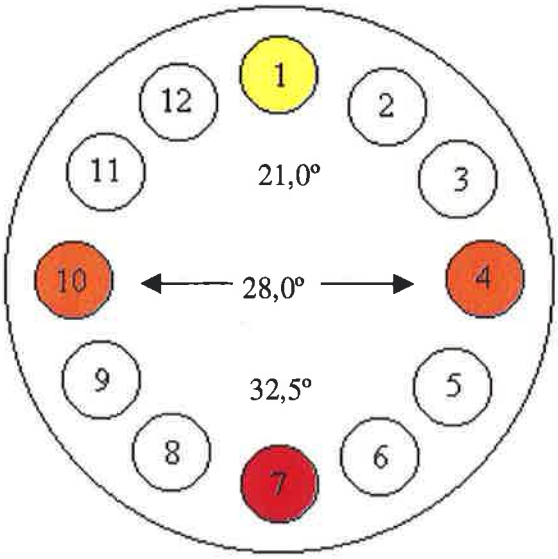


Fig. 61: Distribuição das amostras analisadas no porta-amostras do *Sputtering*.

A tabela 8 a seguir ilustra as características de processo empregadas para deposição dos filmes de TiO_x.

Tab. 7: Condições de deposição para as amostras processadas.

Condições de processo	Espessura nominal [nm]						
	180	170	150	150	120	90	60
Pré-*Sputtering* [min]:	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1	1 1	1
Tempo *Sputtering* [min]:	15 15 15	15 15 12,5	15 15 7,5	15 15 7,5	15 15	15 7,5	15
Tensão *Sputtering* [kV]:	1,60 1,61 1,61	1,65 1,65 1,65	1,62 1,62 1,65	1,65 1,65 1,65	1,62 1,65	1,64 1,65	1,62
Corrente filamento [A]:	78 80 80	79 79 79	78 78 79	79 79 79	78 80	78 79	78
Corrente *Sputtering* [A]:	0,6 0,6 0,6	0,6 0,6 0,6	0,6 0,6 0,6	0,6 0,6 0,6	0,6 0,6	0,6 0,6	0,6
Tensão arco [V]:	38 36 36	36 35 35	38 36 35	36 35 35	40-38 35	43 37	40-38
Corrente arco [A]:	40 40 40	40 40 40	40 40 40	40 40 40	40 40	40 40	40
Pressão O_2 [mBar]:	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]:	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Amostras:	VA, VB VC, VD	VL	VI	VJ	VE, ½VF	VH	½VF, VG
Total / amostras:	48	12	24	12	24	24	24
Total:	168						
Data de processamento:	10/02	04/03	02/03	04/03	11/02	02/03	11/02

Normalmente numa deposição por *Sputtering* o planetário e o porta-amostras devem permanecer girando, durante o processo, para homogeneizar a distribuição de espessuras dos filmes obtidos. No nosso caso, como queríamos justamente deposições em ângulo para obter o comportamento birrefringente, o processo ocorreu

com o porta-amostras fixo, porém o planetário teve que permanecer girando em torno do alvo, ainda que apenas a 1 rpm, também por imposição de segurança do equipamento. As condições de deposição, quais sejam temperatura, pressão e tensão de polarização, asseguram que a estrutura dos filmes depositados seja colunar. As amostras de TiO_x produzidas por *Sputtering* foram caracterizadas e os resultados são apresentados no capítulo 7.

6.2 – Procedimento e receitas para implementação de filtros Fabry-Perot

Os filtros Fabry-Perot com dupla cavidade ressonante foram implementados através de deposições alternadas de camadas de TiO_x e Ag conforme esquematizado na figura 62. As espessuras praticadas foram aquelas obtidas quando da etapa de projeto conforme detalhado no capítulo 5.

Os substratos empregados foram lamínulas de vidro de pequena espessura (~ 0,5 mm) que inicialmente foram submetidas a um procedimento de limpeza conforme a receita a seguir:

1. Enxágüe em H_2O DI por3 min.;
2. Fervura em solução 4 : H_2O + 1 : H_2O_2 (38%) + 1 : NH_4OH (38%) (90 °C, 12 min);
3. Enxágüe em H_2O DI por 3 min.;
4. Fervura em álcool isopropílico por 5min.;
5. Secagem com jato de N_2.

A última etapa de fervura em álcool é necessária pois, dada a espessura do vidro, é bastante difícil remover água sem correr o risco de quebrar o substrato.

Todo o processo de deposição é feito sob um ângulo fixo com relação ao alvo de Ti e a normal local. Tal ângulo ϕ é chamado de ângulo de deposição e já foi tratado na secção anterior. Para efeito de nomenclatura, é dito que as camadas de ressonância (TiO_x) são implementadas em materiais tipo P e S, sendo a diferença

entre eles unicamente uma rotação de 90° em torno do eixo de deposição. Isso pode ser melhor visualizado na figura 63 mais à frente. Sem essa rotação os filtros implementados não apresentam capacidade de polarizar a luz transmitida, ou seja, teremos apenas um filtro de interferência.

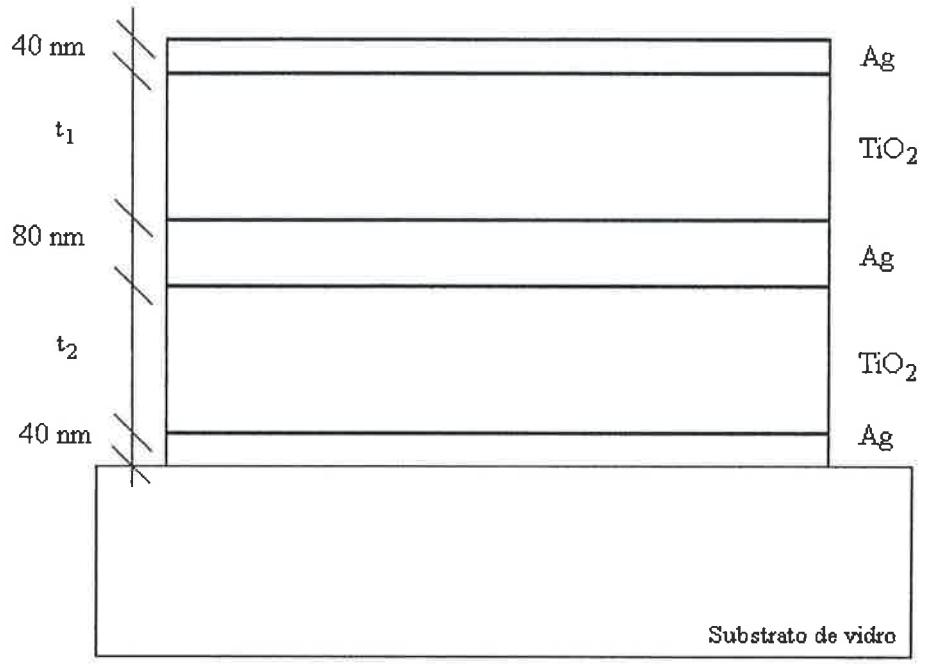


Fig. 62: Estrutura de um filtro Fabry-Perot de dupla cavidade ressonante. t_1 e t_2 são espessuras genéricas detalhadas nas tabelas de receitas.

Os filtros implementados podem ser, grosso modo, classificados como filtros de uma cavidade (implementados a título de teste para a averiguação da validade dos parâmetros de simulação), filtros de dupla cavidade não-polarizadores (teste do procedimento) e filtros polarizadores, que são o objetivo deste trabalho. A única diferença entre os filtros polarizadores para aqueles que não o são é a necessidade de se quebrar o vácuo durante a deposição das camadas de TiO_x / Ag e fazer-se uma rotação de 90° do substrato, conforme indicado na figura 63.

A rotação deve ser feita em algum ponto após a deposição da primeira cavidade ressonante e antes da seguinte. Como a quebra de vácuo implica em expor os filmes depositados ao oxigênio da atmosfera, optou-se por fazer a rotação logo após a deposição de TiO_x da primeira cavidade e antes da deposição do filme de Ag

seguinte. Assim expomos o óxido ao ambiente e não a Ag que poderia acabar se oxidando e alterando as características do filtro.

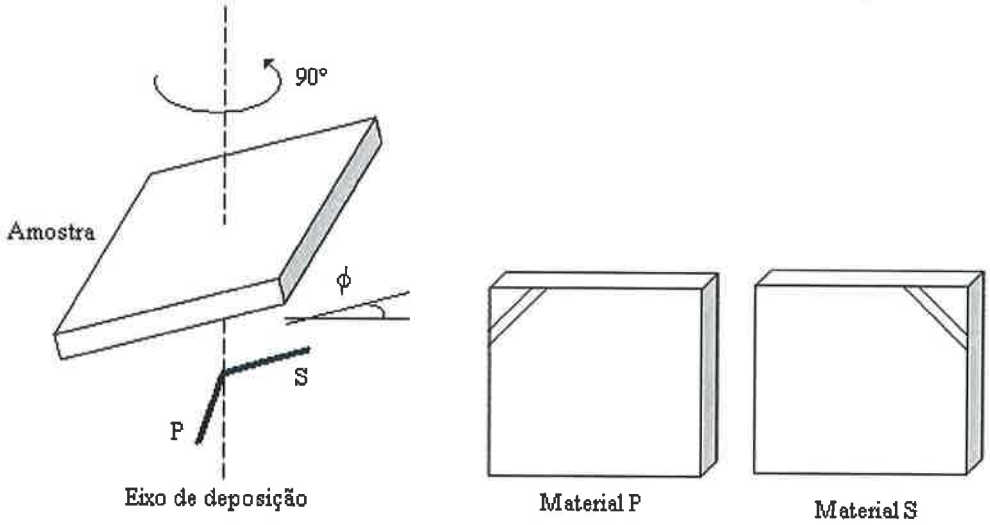


Fig. 63: Rotação das lamínulas de vidro entre as deposições de TiO_x. ϕ é o ângulo de deposição.

Nas tabelas das receitas a serem apresentadas a seguir, tal rotação é claramente indicada para o caso do filtro polarizador. Para o filtro polarizador, foi também executado o procedimento de se fazer a deposição de uma fina camada de Ti sobre a Ag imediatamente antes da deposição de TiO_x. Tal procedimento, chamado de *flash* de Ti, é uma tentativa de se minimizar a oxidação da Ag já que a deposição de TiO_x ocorre em ambiente de O_2 residual. Na seqüência descrevemos as receitas empregadas para obter os filtros de uma e duas cavidades.

➔ Receita 1a: Filtro de uma cavidade ressonante de 67 nm

Material ⇒	**Ag**	**TiO_x**	**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15'42"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [nm]	40	67	80

➔ Receita 1b: Filtro de uma cavidade ressonante de 160 nm

Material ⇒	**Ag**	**TiO_x**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15'	15'	7'30"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [nm]	40		160		80

➔ Receita 02: Filtro não-polarizador

Material ⇒	**Ag**	**TiO_x**			**Ag**	**TiO_x**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	10	5'10"	15	15	11	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [nm]	40		160		80		164		40

➔ Receita 03: Filtro polarizador

Ti — Rotação 90° — Ti

Material ⇒	**Ag**	**TiO_x**			**Ag**	**TiO_x**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	7'30" – 10'0"	4'40"	15	15	9'50" – 11'30"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [nm]	40		160		80		164		40

Na receita 03 acima são indicados os procedimentos de rotação do substrato e os *flashs* de Ti conforme descrito anteriormente. Também são mostradas as faixas de tempo de deposição de TiO_x e as correspondentes faixas de espessura obtidas. O Apêndice I repete todas as receitas apresentadas no presente capítulo em ordem cronológica de realização. O item 7.3 do capítulo 7 a seguir apresentará os resultados obtidos e discussões sobre os filtros implementados.

7 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentaremos os resultados e discussões referentes a: (a) Implementação de um sistema empregando duas câmeras CCD e polarizadores para a obtenção de imagens de diferença de polarização em tempo real; (b) Obtenção e caracterização de filmes finos birrefringentes de TiO_x e; (c) Implementação de filtros de interferência, polarizadores ou não, utilizando-se a estrutura Fabry-Perot associada a filmes birrefringentes compatíveis com tecnologia CMOS. Englobamos todos os tipos de caracterizações que foram executadas, quer sejam elas as dos dispositivos finais, quer sejam as caracterizações intermediárias, como a dos filmes de TiO_2, de cujos resultados depende o próprio projeto final. Em cada uma das secções seguintes, além dos resultados obtidos, também foram detalhados a técnica e o *software*, quando esse for o caso, utilizados para a sua obtenção.

7.1 – Imagens de diferença de polarização (PDI's)

O estudo das características, propriedades e aplicações relacionadas a PDI's já foi abordado no capítulo 3, por isso nos ocuparemos aqui tão somente da metodologia de caracterização, e seus resultados, relacionados a duas técnicas de obtenção de PDI's: a seqüencial no tempo e a simultânea, sendo que cada uma delas é abordada separadamente nas próximas secções.

7.1.1 – Imagens de diferença de polarização utilizando a técnica de aquisição seqüencial no tempo

Ao contrário da metodologia proposta por Tyo, et al. (1998) e também por Wolff (1997) onde se empregavam um polarizador fixo e um TNLC (*Twisted Nematic Liquid Crystal*) para proporcionar uma rotação no próprio eixo da luz incidente, a abordagem aqui utilizada é a de imprimir uma rotação de 90° no próprio polarizador capturando-se assim duas imagens com polarização defasada daquele ângulo de forma seqüencial.

Em princípio tal abordagem deve proporcionar o mesmo resultado alcançado por aqueles autores, mas a rotação mecânica do polarizador acaba por alterar ligeiramente a perspectiva sob a qual a imagem é vista pela câmera. Tal se dá quer pela mudança nas próprias linhas condutoras, quer por imperfeições na lente que não é perfeitamente plana, etc. O fato é que isso, quando se faz a subtração das imagens, acaba por realçar os contornos e bordas da imagem, efeito esse que não está relacionado com a diferença no nível de polarização da luz e portanto é uma fonte de erros.

A despeito disso, o procedimento aqui adotado não fica inviabilizado, prestando-se muito bem para uma exploração preliminar das características das imagens sensíveis ao estado de polarização da luz.

Além disso, outra fonte de erros é o fato de a iluminação do ambiente variar de intensidade ao longo do tempo, introduzindo nas fotos variações aleatórias de intensidade.

Uma possibilidade para reduzir tal erro é a tomada de várias fotos da mesma cena e para a mesma polarização e depois utilizando-se a sua imagem média como imagem de entrada no sistema de PDI, repetindo-se, após, o processo para a outra polarização.

No capítulo 3, os algoritmos para o tratamento de PDI's, em cores (proposto por Tyo et al. (1998), e o monocromático também proposto por Tyo et al. (1996), foram detalhados e o seu funcionamento foi descrito. A partir dos mesmos foi implementado um programa em Java™ capaz de calcular as imagens de soma e diferença de polarização a partir de duas imagens de entrada, cada uma relacionada a um estado de polarização da luz. Esse programa, chamado *Sunfish*, tem a janela de entrada apresentada na figura 64.

Por ser implementado em Java, o *Sunfish* pode rodar em qualquer plataforma que tenha suporte para aquela linguagem. A sua utilização é bastante simples: basta selecionar as duas imagens obtidas com o uso dos polarizadores girados de 90° um em relação ao outro e depois pressionar o botão de diferença. As imagens de soma e de diferença de polarização são calculadas ao mesmo tempo e exibidas em uma outra janela. As imagens exibidas serão em tons de cinza ou em pseudocores conforme o usuário selecione tais opções no painel inferior da janela do programa. Lá também é possível escolher quais cores serão empregadas para destacar as regiões com excesso de polarização *p* ou *s*.

Como vimos, a variação da iluminação introduz uma fonte de erro que é essencialmente aleatória já que o tempo entre uma tomada de imagem e outra também o é. Isso pode ser representado pela equação 7.1.1-1 a seguir.

$$I = \bar{I} + \tilde{i} \qquad (7.1.1\text{-}1)$$

onde I é a imagem medida, que é formada por uma componente fixa, $\bar{I}$, e por uma componente aleatória, $\tilde{i}$, portanto de média nula.

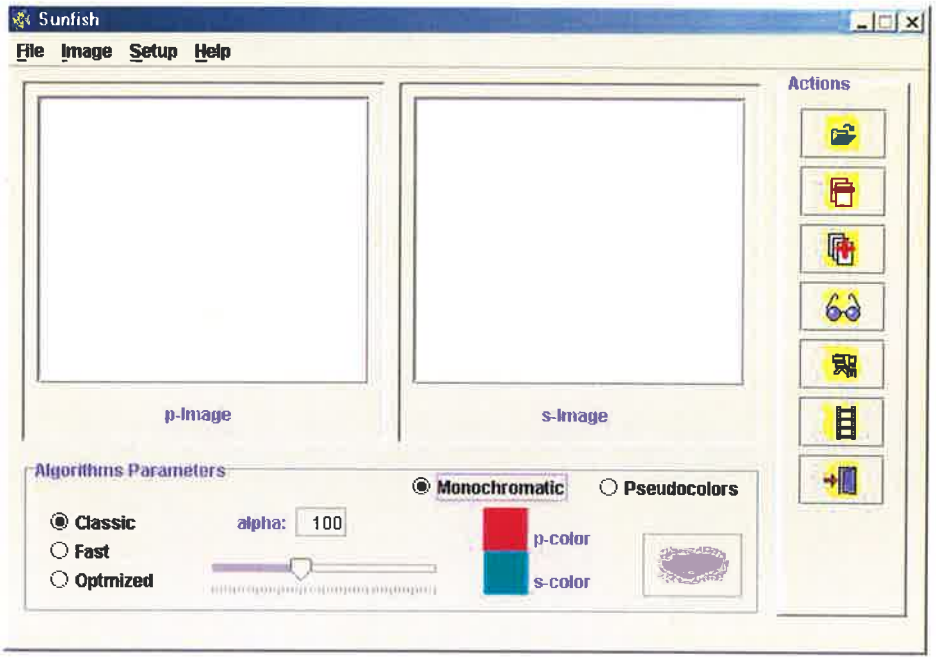


Fig. 64: Janela do programa *Sunfish*.

A presença de $\tilde{i}$ é percebida como erros do tipo impulsivo, ou *salt and peper*, e podem ser minimizados por um procedimento simples que consiste em tomar a média de um número suficientemente grande de imagens, todas nas mesmas condições.

Assim

$$I \rightarrow \bar{I} \text{ quando } \sum_{k}^{n} \bar{I}_k + \tilde{i}_k \text{ p/ } n \rightarrow \infty \qquad (7.1.1\text{-}2)$$

O procedimento delineado na equação 7.1.1-2 foi implementado na forma do programa *SignusPro*, também desenvolvido por nós, em plataforma C++ Builder™. A utilização do *SignusPro* também é bastante simples. Basta selecionar quantas imagens

desejemos para obter a média e clicar em "Imagem Média", depois é só salvar o resultado.

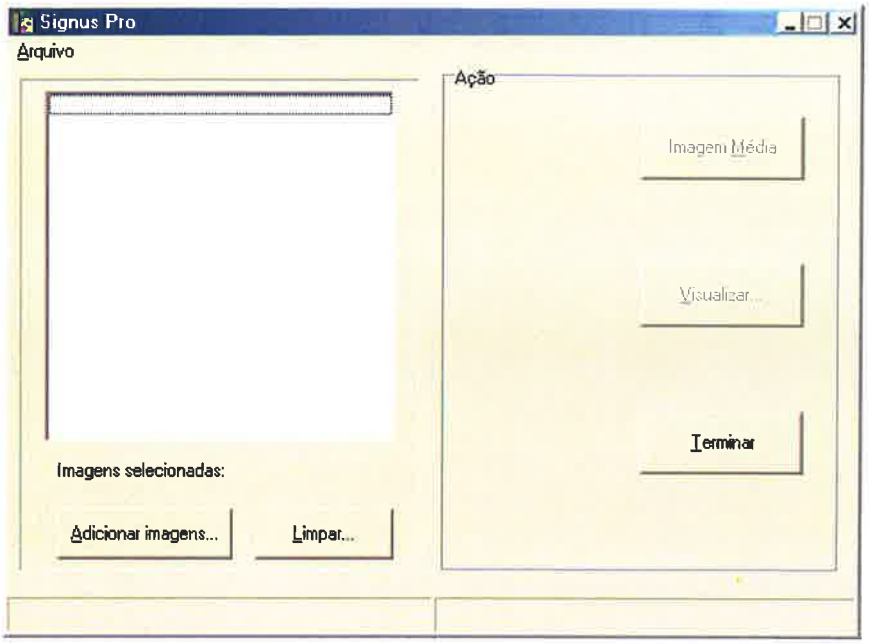


Fig. 65: Janela do programa *SignusPro*.

Isto posto, podemos agora passar à descrição do procedimento e montagem experimentais e em seguida apresentar os resultados obtidos.

A seguir apresentamos o procedimento empregado e na seqüência, a figura 66 aborda a montagem experimental.

1. Posicionar o polarizador em posição *p*
2. Gravar 30 imagens
3. Posicionar o polarizador em posição *s*
4. Gravar 30 imagens
5. Obter imagem média *p* (*SignusPro*)
6. Obter imagem média *s* (*SignusPro*)
7. Obter imagens de soma e diferença de polarização (*Sunfish*)

Seguindo-se a seqüência esboçada acima e usando a montagem da figura 66 temos um sistema simples de aquisição de imagens sensíveis à polarização da luz. Com ele pesquisamos as seguintes propriedades ligadas a um sistema PDI:

- Possibilidade de distinção entre materiais metálicos e dielétricos;
- Possibilidade de determinação da curvatura de um objeto;
- Melhoria das condições de visibilidade em ambientes turvos.

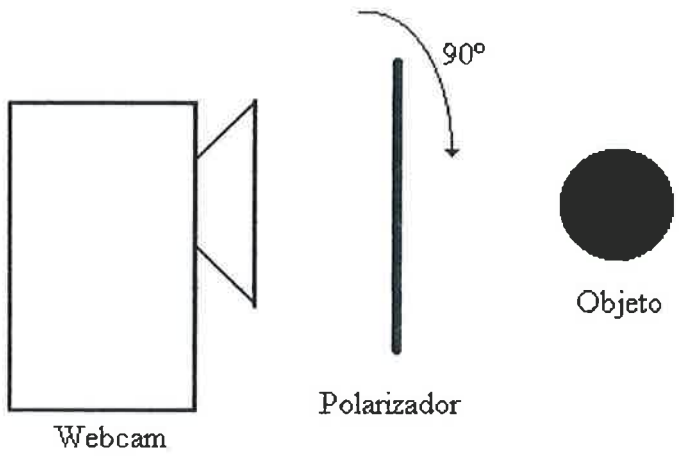


Fig. 66: Montagem experimental empregada para obtenção de PDI's.

Para o primeiro teste empregamos como objeto uma base de plástico (dielétrico) sobre a qual repousava uma esfera metálica. Usamos três tipos de base plástica, uma de cor escura e brilhante, outra transparente e uma terceira de cor clara mas fosca.

Os resultados, vistos na figura 67 mostram que existem diferenças de polarização para a luz refletida tanto para metais quanto para dielétricos. Logo, a simples presença de um sinal de polarização não nos permite distinguir entre metais e dielétricos. Por outro lado, como vemos na figura 67-f, o menor contraste apresentado por essa imagem implica numa menor diferença de polarização. Daí pode-se concluir que não importa se o material observado é metálico ou dielétrico, mas sim se ele reflete bem ou não a luz. A figura 68 ilustra melhor esse resultado.

Na figura 68-a, a luz é espalhada em todos os ângulos. Como mostrado no capítulo 3, o grau de polarização da luz é sensível ao ângulo sob o qual o objeto é visto (em relação à normal num dado ponto). Com isso a luz espalhada apresenta muito pouco grau de polarização, ao passo que a luz refletida como mostrado na figura 68-b, pode apresentar um alto nível de polarização, dependendo ainda do ângulo sob o qual é vista.

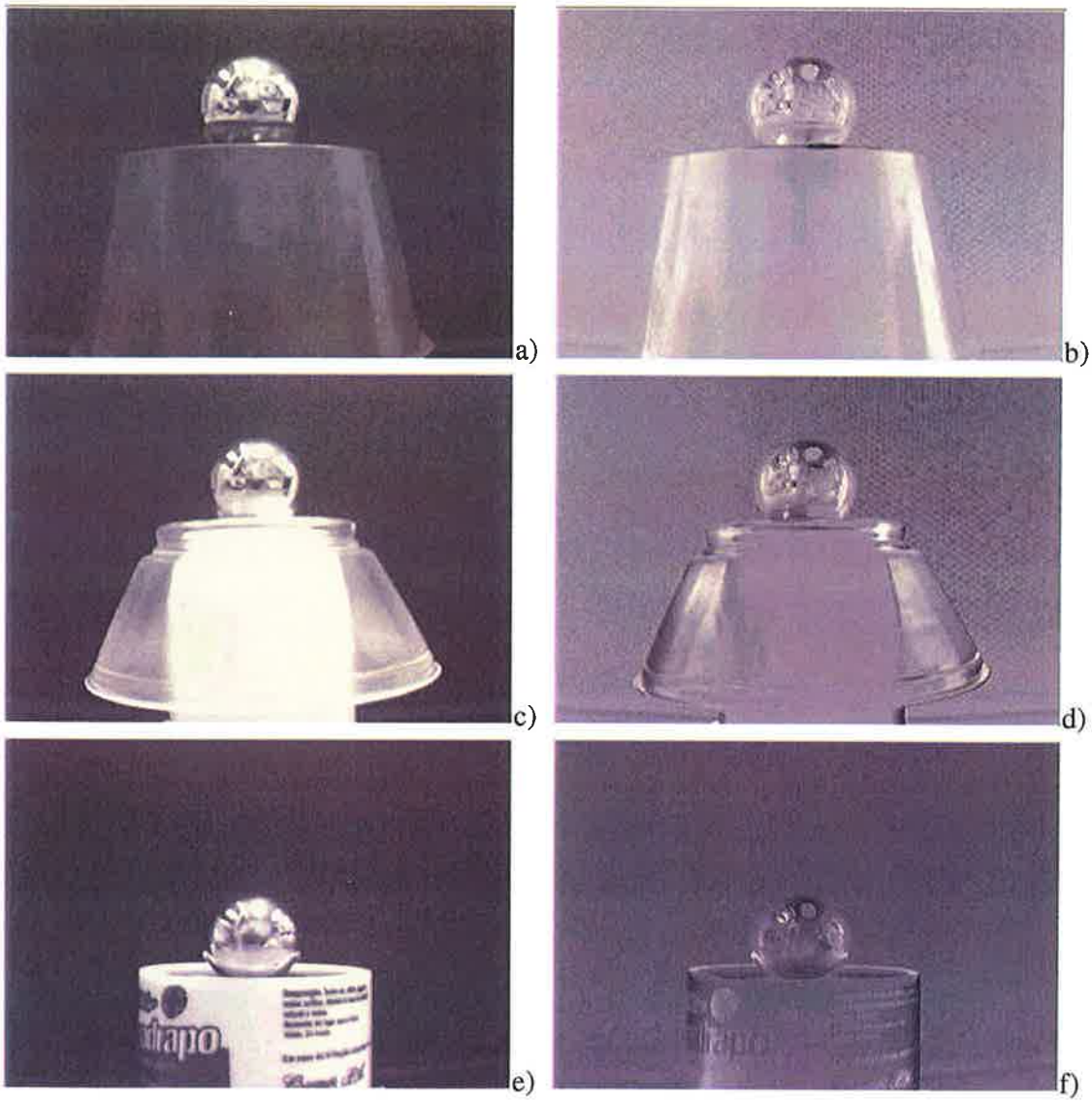


Fig. 67: Primeiro teste: distinção entre materiais através da PDI. a) base escura, soma, b) base escura diferença, c) base transparente soma, d) base transparente diferença, e) base fosca soma e f) base fosca diferença.

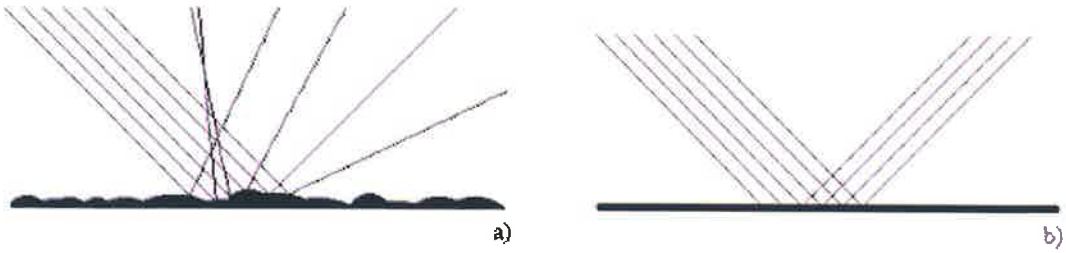


Fig. 68: Reflexão da luz por superfície rugosa (fosca) a) e lisa (brilhante) b).

Essa característica da variação do índice de polarização em função do ângulo de visão e/ou iluminação é o que nos remete para o próximo teste, ou seja, a visualização da curvatura de um objeto a partir da imagem de diferença de polarização.

a)

b)

Fig. 69: Segundo teste: visualização da curvatura de um objeto usando PDI: (a) Imagem de diferença em tons de cinza; (b) imagem de diferença em pseudocores.

A demonstração aqui é apenas qualitativa, como podemos ver nas figuras 69-a e 69-b, já que não nos ocupamos dessa característica das PDI´s em nosso estudo. Por outro lado, não podemos nos furtar de sugerir essa possível aplicação que poderia ser bastante útil, por exemplo, na reconstrução de imagens em 3D.

A reconstrução 3D implica, atualmente, no uso de duas câmaras ligeiramente deslocadas de modo a ver o objeto sob ângulos ligeiramente diferentes. Essa mudança de perspectiva é o que permite a reconstrução do objeto no espaço 3D.

Ora, se pudermos implementar um algoritmo que, dada uma imagem de diferença de polarização, como a da figura 69-a ou 69-b, determine a sua curvatura em função do nível de polarização, ou seja, determine o ângulo formado pela normal local e o ângulo de visão (conhecido) em função do nível de polarização nesse ponto, então poderemos ter uma estimativa em 3D do objeto, dispensando o uso de uma segunda câmera deslocada.

Na figura 69-a, regiões mais claras representam um excesso de polarização *p*, ao passo que regiões mais escuras representam excesso de polarização *s*. Já na figura 69-b, tais regiões são distinguidas pela sua cor: vermelho para *p* e verde para *s*.

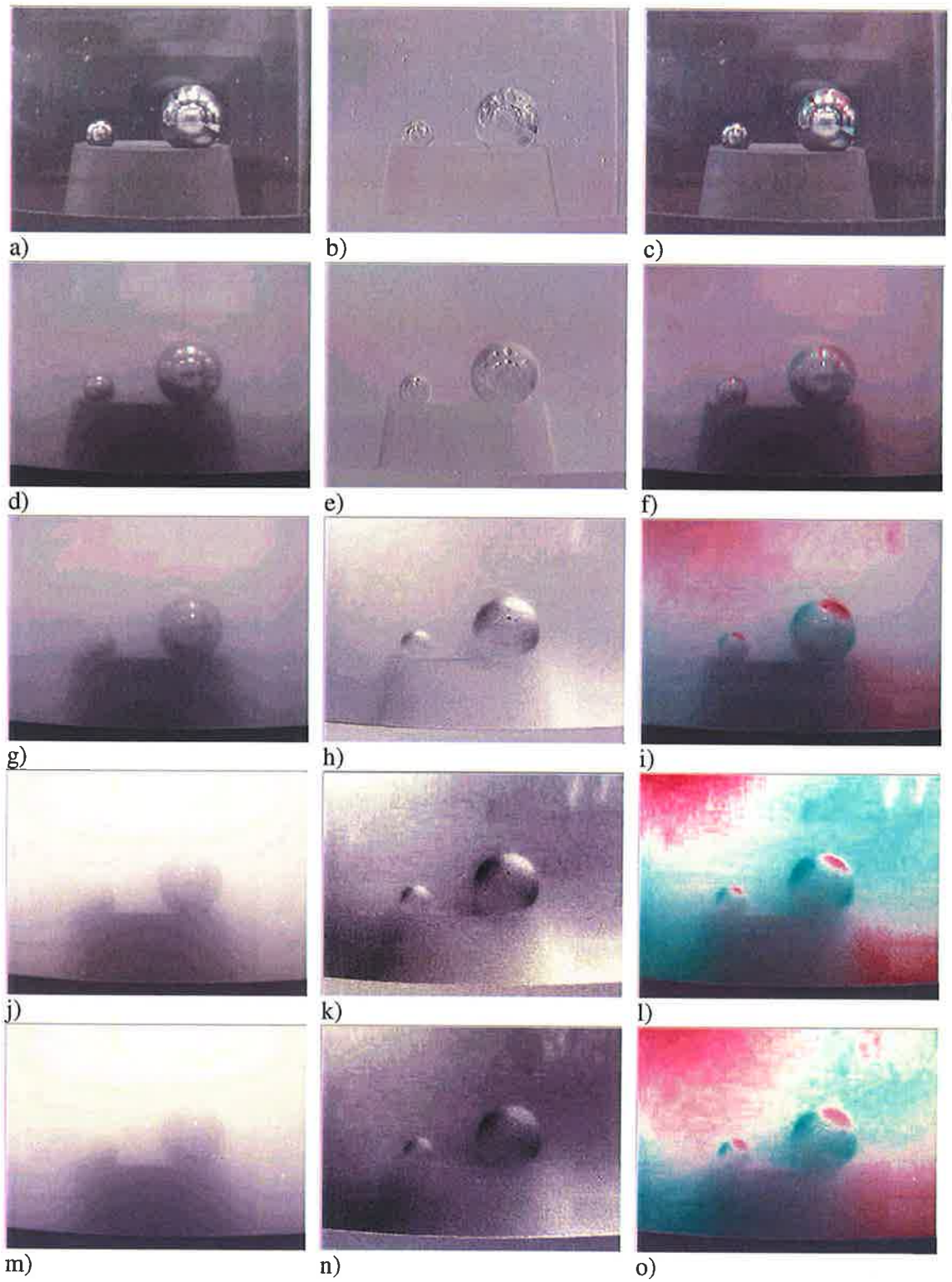
Finalmente, o terceiro teste que apresentamos aqui mostra a melhoria da visibilidade de objetos imersos em ambientes turvos. O objeto visualizado agora é formado por duas esferas metálicas sobre a base de plástico, com a diferença de que o mesmo é submerso num aquário com água à qual é acrescentada uma quantidade crescente de leite-em-pó, o que faz com que a visibilidade através da mesma vá se degradando em função da quantidade de leite (suspensão de particulados).

Assim, a massa de uma unidade de medida de leite é de 0,74 g, sendo que a capacidade do aquário é de 10,1 cm x 14,5 cm x 10,1 cm $\cong$ 1479 cm^3 $\cong$ 1,48 l, podemos então levantar os dados da tabela 8 a seguir.

Tab. 8: Condições experimentais para o terceiro teste: visibilidade em ambientes turvos.

Quant. [colheres]	Massa [g]	Concentração [g/l]
0	0,00	0,0
1	0,74	0,5
2	1,48	1,0
3	2,22	1,5
4	2,96	2,0
5	3,70	2,5
6	4,43	3,0

Na figura 70 a seguir vemos as imagens de soma e de diferença de polarização, estas em cores ou em tons de cinza.


a)
b)
c)
d)
e)
f)
g)
h)
i)
j)
k)
l)
m)
n)
o)

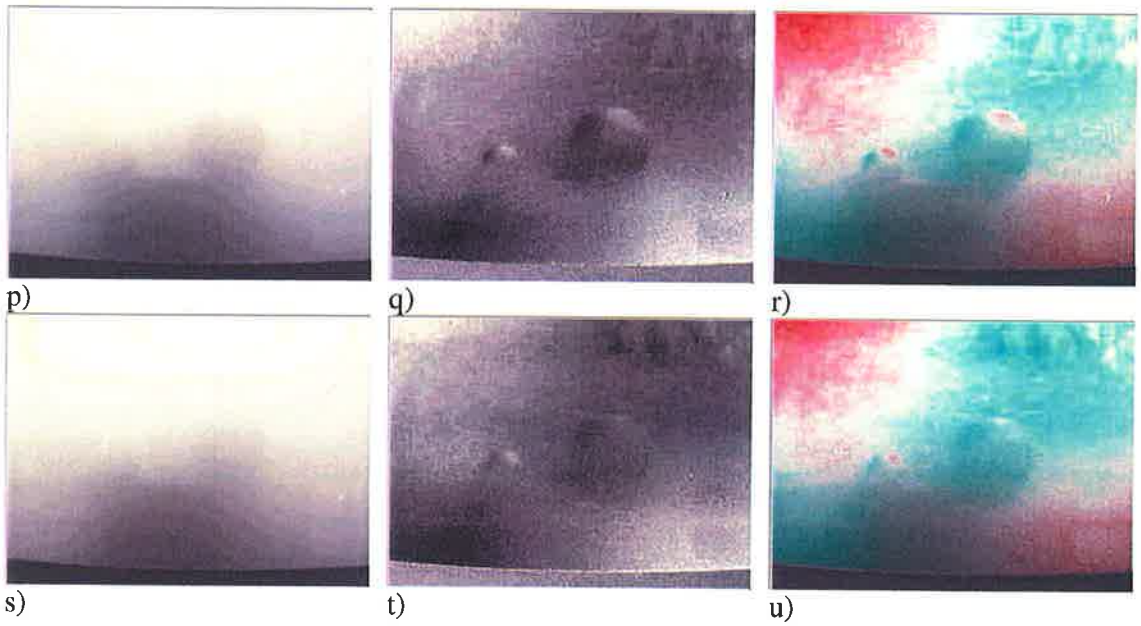


Fig. 70: PDI em ambientes turvos. Primeira coluna: imagem de soma (convencional); segunda: PDI em tons de cinza; terceira: PDI em pseudocores. De cima para baixo: nenhuma colher de leite, até seis colheres na última linha.

Como podemos notar, o aumento da concentração de leite degrada ambas as imagens, a de soma e a de diferença, mas essa última consegue manter um maior contraste mesmo em condições mais precárias. Tal característica nos permite distinguir as esferas metálicas mesmo quando isso já não é possível na imagem de soma.

Um fenômeno interessante e que não é reportado pela literatura, é o aumento da polarização de fundo, que é justamente o contrário do que esperávamos. Tal fato pode ser um problema próprio do sistema de PDI que é empregado nesse estudo, ou seja, a rotação mecânica do polarizador, aliado ao fato de que as imagens são tiradas seqüencialmente no tempo, o que possibilita que as partículas em suspensão na água tenham se deslocado entre uma medida e outra.

7.1.2 – Imagens de diferença de polarização utilizando a técnica de aquisição multiplexada

Os principais problemas relacionados na secção anterior são o desvio de perspectiva, sob a qual se vê a imagem, devido à rotação mecânica do polarizador e a

possibilidade de movimento entre os elementos que compõem a cena, problema advindo do fato de as imagens serem tomadas seqüencialmente no tempo (a rotação do polarizador, a tomada das imagens e o cálculo de sua média, etc, são atividades que demandam muito tempo, impossibilitando uma operação em tempo real).

A montagem experimental proposta por Tyo et al. (1996) e Wolff (1997), ou seja, o uso de um TNLC (*Twisted Nematic Liquid Crystal*) associado a um filtro polarizador fixo, resolve o problema da mudança de perspectiva, mas ainda assim não é um sistema de tempo real, já que ainda são necessárias a tomada de duas imagens seqüenciais no tempo, uma antes e outra após a atuação do TNLC.

Visando resolver ambos os problemas, propomos uma nova abordagem onde empregamos duas câmeras cada uma associada a um polarizador fixo. Para que ambas as câmeras captem a mesma imagem, empregamos um semi-espelho com eixo inclinado de 45° com relação ao caminho percorrido pelos raios de luz. Nessa abordagem o posicionamento das câmeras é crítico para que possamos garantir que haja um mapeamento exato de cada ponto no objeto para um mesmo *pixel* em cada imagem. Assim, cada câmera deve ser posicionada com o uso de uma mesa XY e ter seus parâmetros de captação de imagens rigorosamente ajustados para que as diferenças entre as imagens obtidas se devam unicamente à variação de níveis de polarização em cada ponto do objeto observado.

Outro problema é a possibilidade de que os polarizadores não atenuem de forma idêntica a luz transmitida, resultando daí uma diferença que não se deve propriamente ao nível de polarização do objeto, mas sim a diferenças nos polarizadores. Para um melhor desempenho em termos de ruído, toda a montagem acima descrita deverá ser encerrada numa caixa hermética para a luz. A figura 71 mostra o desenho esquemático dessa montagem.

As câmeras C_1 e C_2 foram montadas sobre uma estrutura de alumínio para permitir tanto a sua fixação a uma mesa XY, quanto o posicionamento do polarizador, que deverá permanecer fixo à frente da lente da câmera. A figura 72 ilustra tal estrutura.

Uma vez já determinada a orientação do eixo polarizador de cada um dos filtros, bastou fixá-los na estrutura da figura 71 de forma que P_1 tenha um eixo perpendicular a P_2.

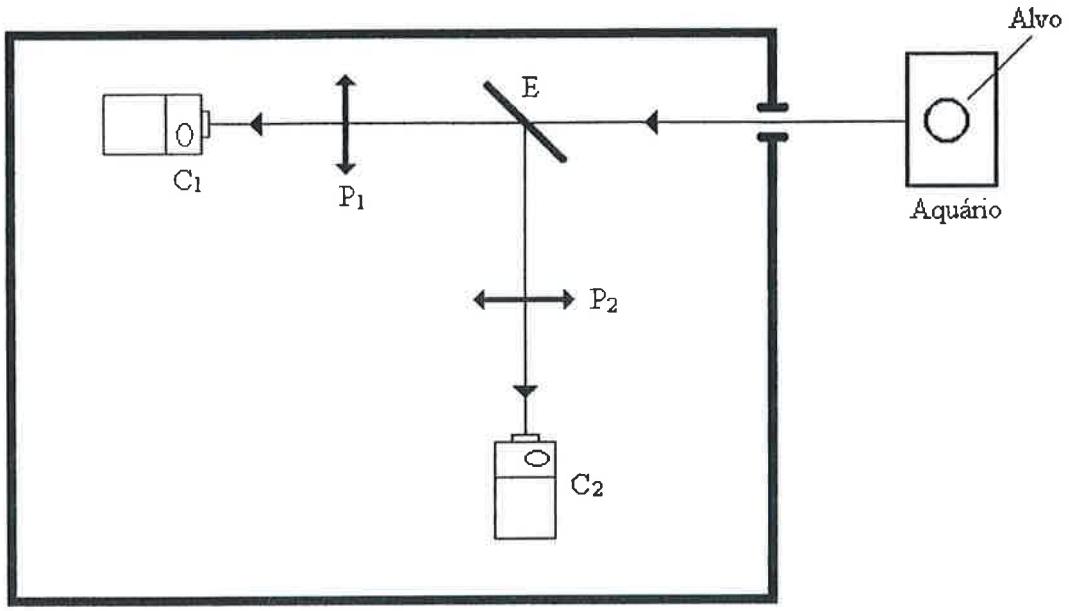


Fig. 71: Montagem experimental com duas câmeras, C_1 e C_2. E é um semi-espelho posicionado a 45° com relação à trajetória da luz. O alvo é a esfera metálica já empregada nas experiências da seção anterior.

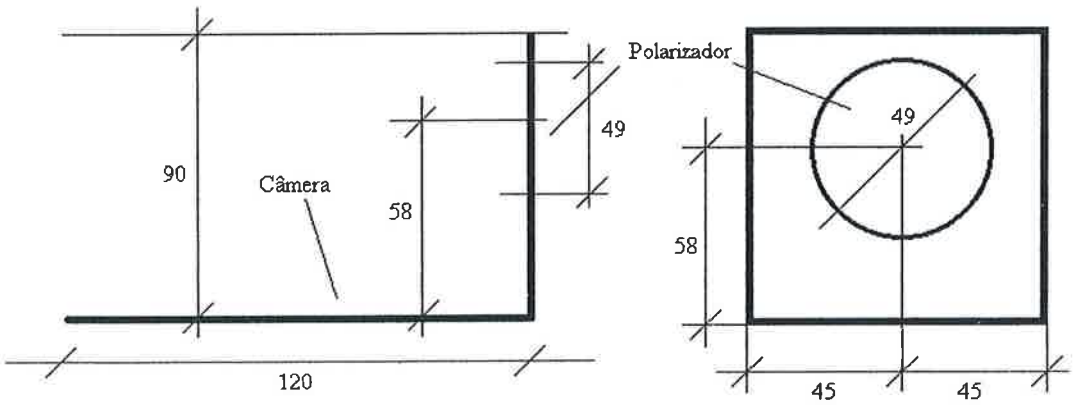


Fig. 72: Estrutura para o posicionamento da câmera e do polarizador.

Com isso implementamos um sistema de aquisição de imagens sensível ao estado de polarização da luz que pode trabalhar em tempo real e também que não introduz erros devido a mudanças de perspectiva, mas que é sensível ao posicionamento das câmeras e também às características individuais de cada um dos polarizadores (parâmetros esses, no entanto, que podem ser ajustados e suas diferenças reduzidas ou suprimidas).

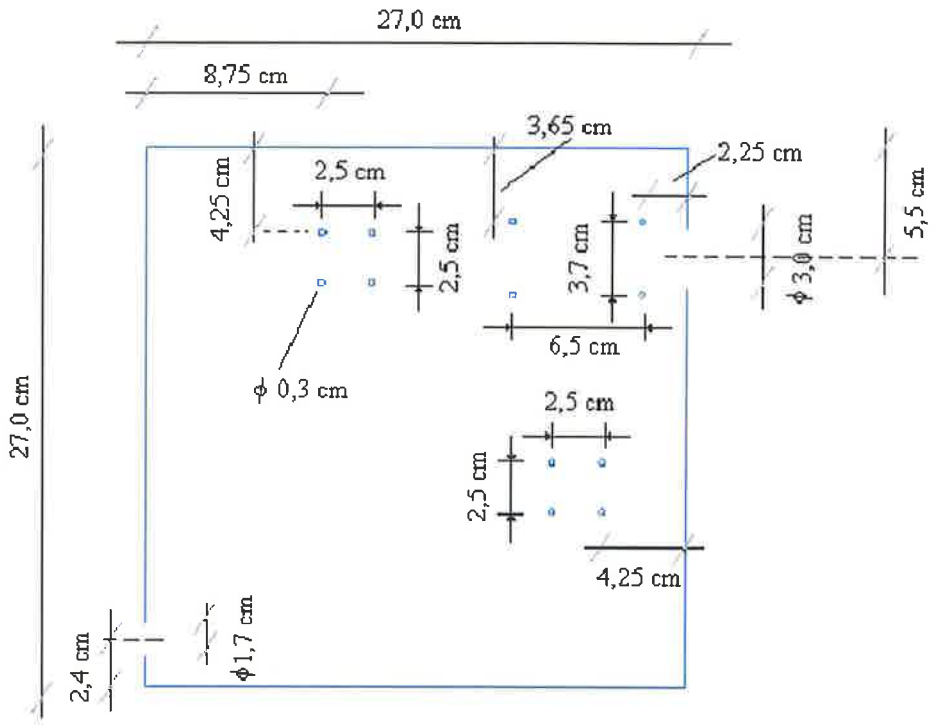


Fig. 73: Detalhamento da figura 71.

A montagem ilustrada na figura 71 também apresenta os seus problemas. O primeiro deles é que não existem duas câmeras exatamente iguais e portanto, diferenças nas imagens poderiam surgir devido a isso. Também os polarizadores empregados podem apresentar características distintas no que tange à conformação de sua lente, diferentes graus de atenuação, etc. Tais problemas, no entanto, podem ser resolvidos ou pelo menos amenizados através de controles individuais nas características das câmeras, tais como contraste, brilho, etc.

As câmeras C1 e C2 (figura 71) foram conectadas a uma placa de captura de vídeo e as imagens foram adquiridas de forma multiplexada no tempo. Na verdade, como a taxa de captura dos *frames* era bem elevada (25 *frames*/s), esse sistema funcionou praticamente como um sistema de tempo real. O sistema para a aquisição de imagens, com exceção das câmeras, foi adquirido comercialmente da empresa *Security Ware*® que forneceu tanto o kit básico, composto por manual de instruções, console com o roteador, placa de captura de vídeo e cabos com conectores DB, quanto o *software* utilizado para o controle das características das câmeras bem como a exibição e arquivamento (formato jpeg) das imagens por elas capturadas (veja figura 74).

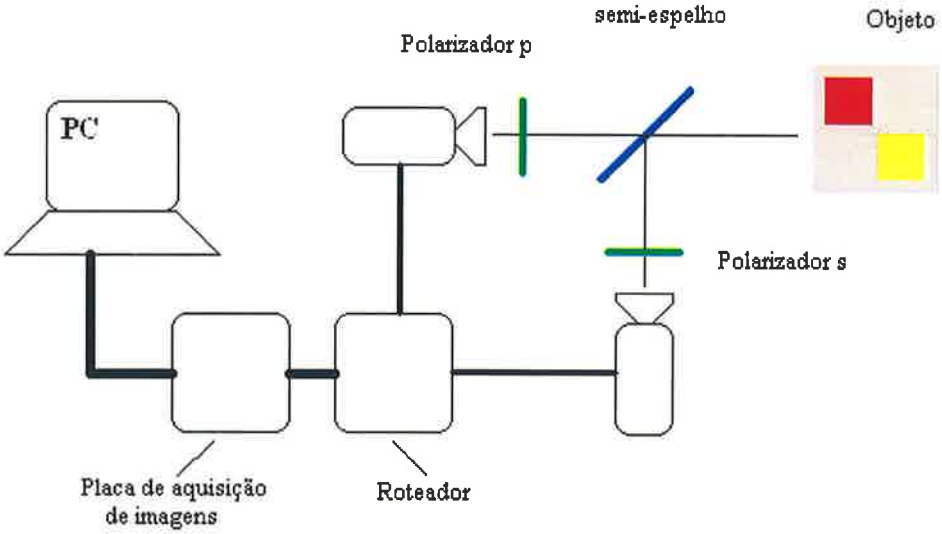


Fig. 74: Esquema ilustrativo do funcionamento do sistema completo de obtenção de imagens de diferença de polarização utilizando a técnica de aquisição multiplexada.

O pós-processamento, ou seja, a subtração e adição de imagens, foi efetuado com o programa *Polaris*, cuja janela principal pode ser vista na figura 75.

Fig. 75: Janela principal do *software Polaris*.

Apesar do sistema mostrado na figura 74 fazer a captura das imagens em tempo real, ele não incorpora a capacidade de subtração das mesmas, fazendo com que a utilização do mesmo se baseie na sua capacidade de tirar "fotos simultâneas", gerando-se então imagens que deverão ser processadas com o *Polaris*. Isso, no entanto, traz um problema que é o da definição das imagens. Como no caso de uma só câmera, também aqui é necessário o uso do programa *SignusPro* para a obtenção de uma imagem média que apresente menos erros devidos à variação da iluminação. O procedimento aqui é o mesmo já reportado no início deste capítulo.

Outro problema se deve às diferenças introduzidas nas imagens por conta das diferenças entre as câmeras e no sistema óptico (distorções desiguais nas lentes das câmeras, pequenos desalinhamentos no posicionamento das mesmas e também ao fato de o semi-espelho não apresentar transmitância/reflectância de exatamente 50%).

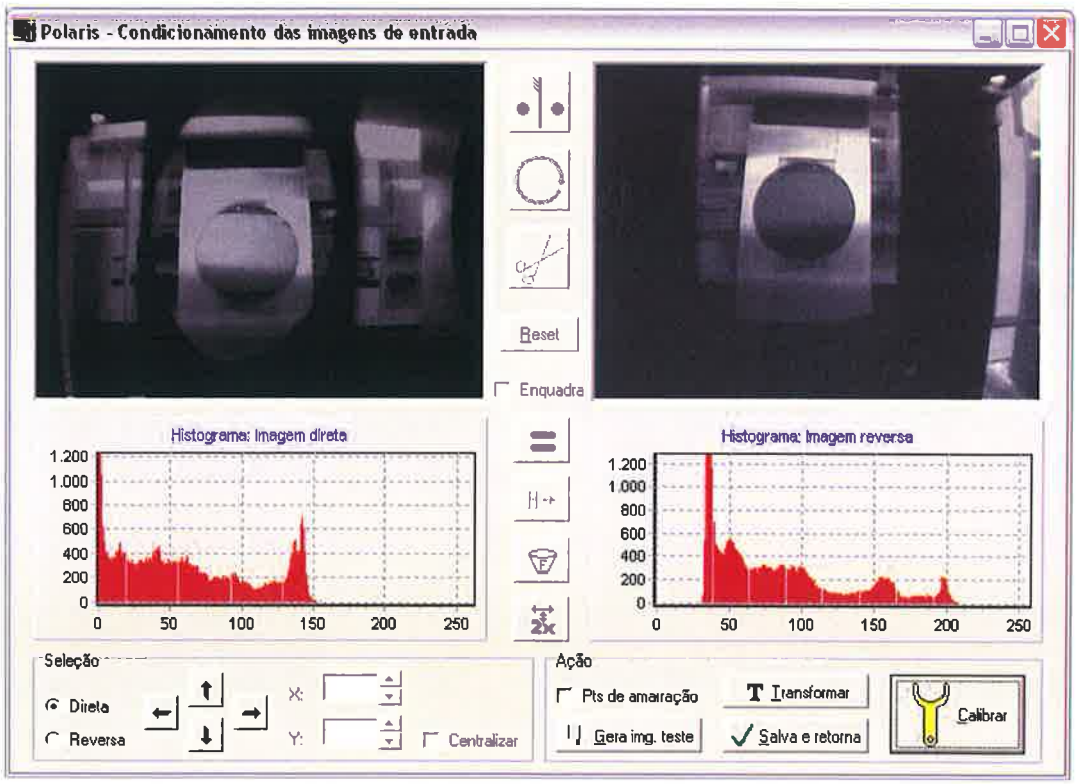


Fig. 76: Opções de ajuste das imagens no *software Polaris* antes da obtenção das PDI e PSI.

Em função desses problemas, não foi possível simplesmente fazer a subtração entre as imagens médias geradas pelo programa *SignusPro*. Foram implementadas algumas funções adicionais no programa *Polaris*, acessíveis a partir do botão

"Condicionar" da janela principal e que estão disponíveis conforme mostrado na janela seguinte (figura 76).

As distorções e deslocamentos/rotações existentes de uma imagem para a outra foram corrigidas aplicando-se uma transformação linear como a expressa na equação 7.1.2-1:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= a \cdot x + b \cdot y + c \cdot xy + d \\ \hat{y} &= e \cdot x + f \cdot y + g \cdot xy + h \end{aligned} \qquad (7.1.2\text{-}1)$$

Com a ajuda de uma imagem de calibração (foi empregado um papel negro, opaco, com furos pelos quais passava a luz para gerar tal imagem), foram obtidos os coeficientes a a h para as coordenadas conhecidas (x,y) e ($\hat{x}, \hat{y}$) de uma e outra câmera.

Como uma tentativa para compensar as diferenças nas imagens introduzidas pelo semi-espelho (a imagem refletida é sempre de pior qualidade em relação à transmitida), também foi implementado um procedimento de equalização de histograma da imagem do espelho (a qual chamaremos de imagem reversa) seguido de uma redefinição do histograma baseado na imagem transmitida (daqui pra frente imagem direta). Apesar desse procedimento realmente melhorar a qualidade da imagem reversa, ele acabou não sendo utilizado por afetar as diferenças devidas ao estado de polarização captado em cada imagem, que é justamente o que queremos determinar.

Quanto ao procedimento experimental, ele é semelhante ao já descrito para os experimentos com uma única câmera e são assim detalhados:

1. Gravar 25 imagens de cada uma das câmeras (simultaneamente com o *sistema multiplexado*);
2. Gerar imagens médias para as 2 câmeras (*SignusPro*);
3. Calibrar as imagens médias com o Polaris e gerar as imagens de soma e diferença de polarização.

Nos experimentos a seguir, empregamos um suporte, supostamente não-polarizador, e sobre ele posicionamos um disco de vidro polarizador. As imagens foram tomadas com o alvo (suporte + disco) dentro de um aquário de vidro sem água, com

água pura e depois no aquário com água à qual foi diluída uma quantidade crescente (até 3 ou 4 colheres de medida) de "Leite de magnésia" (LM) para torná-la turva.

Tab. 9: Alvo de alumínio. Condição: aquário sem água.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 10: Alvo de alumínio. Condição: aquário com água.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 11: Alvo de alumínio. Condição: água com 0,8 g (1 colher) de leite de magnésia (LM).

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 12: Alvo de alumínio. Condição: água com 1,6g (2 colheres) de LM.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 13: Alvo de alumínio. Condição: água com 2,4 g (3 colheres) de LM. A iluminação é feita apenas por uma luminária.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 14: Mesmo caso da tabela anterior, agora com iluminação ambiente além da luminária.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 15: Alvo de alumínio. Condição: água com 3,2 g (4 colheres) de LM. A iluminação é feita apenas por uma luminária.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 16: Mesmo caso da tabela anterior, agora com iluminação ambiente além da luminária.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Foram empregados dois tipos de suporte: uma base de alumínio, opaca portanto; e uma base de plástico transparente. No primeiro caso a iluminação ocorreu pela frente do alvo e acima do mesmo, e no segundo caso ela foi feita por trás do alvo.

Devido ao tamanho do semi-espelho, a imagem de interesse foi apenas uma fração da imagem total. Os resultados alcançados podem ser vistos nas tabelas de figuras de 10 a 17:

Na seqüência anterior de tabelas, de 10 a 17, foi apresentado o caso em que utilizamos alvo de alumínio e pudemos ver que a qualidade das imagens de diferença de polarização (tanto as monocromáticas quanto as em pseudo-cores) sempre pioram com o aumento da concentração de leite de magnésia (LM). Por outro lado, a PDI, mesmo nos piores casos, sempre indica que há "algo" na imagem, mesmo não dando para distinguir-se o alvo e nem o elemento polarizador.

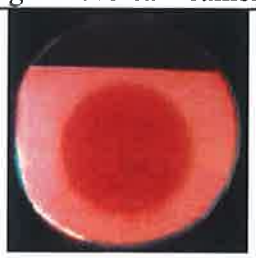
Tab. 17: Alvo de plástico. Condição: aquário sem água.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 18: Alvo de plástico. Condição: aquário com água.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 19: Alvo de plástico. Condição: água com 0,8g (1 colher) de leite de magnésia (LM).

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	 Imagem de diferença (em pseudo-cores)

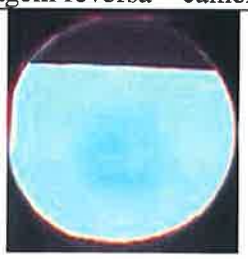
Tab. 20: Alvo de plástico. Condição: água com 1,6g (2 colheres) de LM.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudocores)

Tab. 21: Alvo de plástico. Condição: água com 2,4g (3 colheres) de LM. A iluminação é feita apenas por uma luminária.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Tab. 22: Mesmo caso da tabela anterior, agora com iluminação ambiente além da luminária.

Imagem direta – câmera 1		Imagem reversa – câmera 2
Imagem de soma	Imagem de diferença	 Imagem de diferença (em pseudo-cores)

Como só podemos fazer um ajuste visual grosseiro com relação ao brilho das duas câmeras, não é possível compensar as diferenças impostas pelo semi-espelho, e por isso não pudemos obter imagens de melhor qualidade.

Acreditamos que se forem utilizadas câmeras com ajustes finos individuais, ou se for utilizado um semi-espelho de características mais rigorosamente controladas, tal

deficiência poderia ser, em muito, compensada, proporcionando imagens de melhor qualidade, o que permitira visualizações melhores para condições piores de turbidez.

Na seqüência seguinte de tabelas, de 18 a 23, temos o mesmo experimento utilizando alvo transparente sobre o qual está o elemento polarizador.

Para essa seqüência de tabelas, onde o elemento polarizador foi montado sobre um alvo transparente, só foi possível distinguir qualitativamente alguma imagem até 2,4 g (3 colheres) de leite de magnésia (LM) comparado ao caso anterior onde o alvo era de alumínio. Por outro lado, devemos levar em consideração que um alvo transparente em água deverá apresentar um maior nível de dificuldade quanto à sua detecção devido a menor quantidade de luz refletida. Ainda assim, como no caso anterior, as PDI's sempre indicam que há algo, mesmo que indistinto, no aquário.

Os resultados discutidos até agora tiveram por objetivo apresentar, qualitativamente, os testes de dois sistemas capazes de obter imagens de diferença de polarização, lançando mão de uma ou duas câmeras e polarizadores.

Como não pretendemos fazer nenhuma analisa quantitativa, nenhum cuidado mais rigoroso foi tomado com relação a procedimentos de medida do caminho óptico, o que serviria como uma figura de mérito para indicar o quão mais turva é uma situação do que outra. Por outro lado, ficou devidamente demonstrado que PDI's são bastante interessantes para localização de alvos em ambientes adversos, ainda que não se disponha de clareza suficiente para identificar esses alvos. Maiores investimentos na qualidade/flexibilidade do equipamento utilizado poderiam tornar perfeitamente possíveis aplicações que requeiram melhor precisão de medidas e um tratamento mais rigoroso dos dados.

7.2 – Caracterização dos filmes de TiO_x

Essa etapa prévia de caracterização dos filmes de TiO_x é fundamental pois dela dependeu a obtenção dos valores dos índices de refração e espessuras que serviram de base para o projeto dos filtros de interferência (capítulo 5).

As amostras aqui analisadas foram obtidas conforme procedimento descrito no capítulo 6.

As análises efetuadas foram de duas naturezas: óptica e por bombardeamento de íons (He^{++}). A primeira consistiu no estudo dos espectros de transmitância para comprimentos de onda variando desde o infravermelho próximo (NIR) até o ultravioleta (UV). Desta técnica foi possível extrair o valor do índice de refração complexo (partes real e imaginária) em função do comprimento de onda e também a espessura do filme (veja Anexo I). Já a segunda consistiu no estudo dos espectros RBS (**R**utherford **B**ack-**S**cattering) do qual foi obtida a estequiometria do filme e também a concentração planar total com a ajuda do programa SIMRA (veja apêndice IV).

As próximas secções abordam essas duas técnicas, bem como apresentam os resultados obtidos e as conclusões a que se pode chegar.

7.2.1 – Espectrofotometria dos filmes de TiO_x

Utilizando o equipamento de Sputtering DC, foram depositados filmes de TiO_x com espessuras nominais esperadas de 90, 120 e 180 nm sobre substratos de vidro empregando-se receita padrão já descrita no capítulo 6. Foram depositadas uma grande quantidade de amostras em muitas condições diferentes sendo que a tabela 24 resume todos os filmes que apresentaram birrefringência maior do que 0,02 para pelo menos 2 comprimentos de onda (variação entre n_p e n_S para 468, 550 e 630nm) de acordo com a análise de espectrofotometria. Na primeira coluna da tabela 24 estão discriminados não só os nomes das amostras como também a condição em que houve a maior diferença de índices de refração (indicativo de maior birrefringência). Assim:

— - 90° → Maior diferença entre as medidas em posição normal e girada
p-s → Maior diferença entre as medidas com polarizador nas posições *p* e *s*
p-s_90° → Idem ao anterior mas para as amostras giradas

A última coluna da tabela 24 resume a classificação de birrefringência considerando medidas realizadas no comprimento de onda de 550 nm (valor mais próximo de projeto no capítulo 5). A maior birrefringência nesse caso foi de 0,03667 tendo sido este valor empregado no projeto apresentado no capítulo 5. É importante também destacar que a tabela 24 corresponde a apenas uma pequena parcela de amostras fabricadas, cuja birrefringência resultou maior que 0,02.

Tab. 23: Resultados dos filmes que apresentaram maiores diferenças de índice de refração.

Amostra	Espessura nominal [nm]	Δn (458)	Δn (550)	Δn (633)	Rank (550 nm)
VA01 (p-s)	180	0,03347	0,02776	0,02350	3
VB01 (p-s)	180	0,01981	0,02522	0,02886	5
VB07 (p-s)	180	0,01752	0,02207	0,02569	8
VC07 (p-s_90°)	180	0,04125	0,03667	0,03164	1
VE01 (— - 90°)	120	0,03124	0,03018	0,02920	2
VE13 (— - 90°)	120	0,02456	0,02445	0,02430	6
VH07 (p-s_90°)	90	0,01802	0,02102	0,02358	9
VH08 (p-s)	90	0,02313	0,02228	0,02171	7
VH09 (p-s)	90	0,02443	0,02550	0,02650	4

A figura 77 apresenta os espectros da amostra VC07 (p-s), aparecendo sobrepostos os espectros das condições de maior diferença de índice de refração.

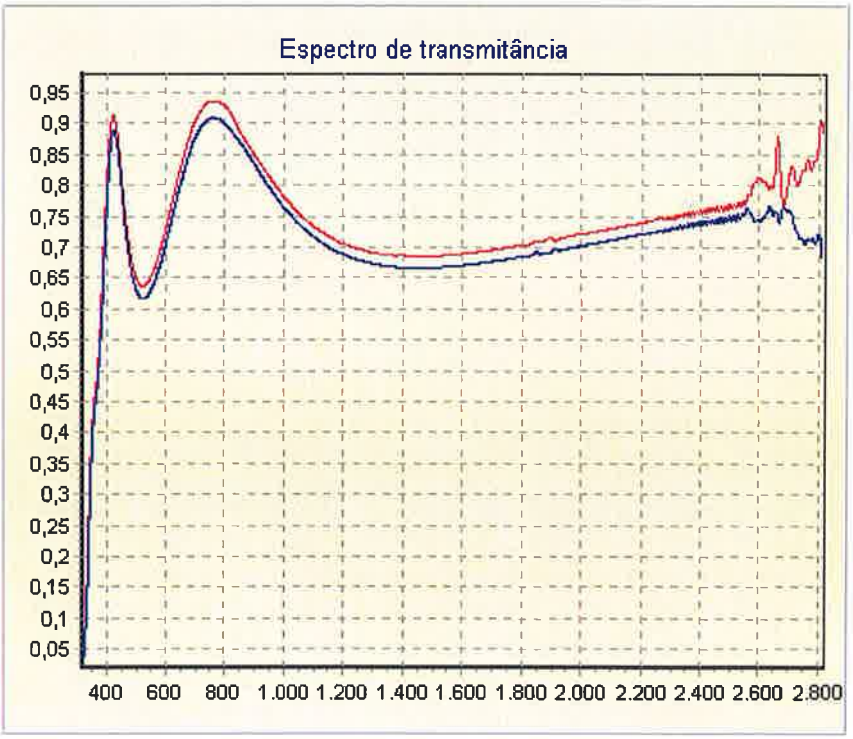


Fig. 77: VC07 p_90° (vermelho) e s_90° (azul). Rank 1.

A partir dos dados da tabela 24, foram feitas as simulações necessárias para o projeto dos filtros de interferência, relatados no capítulo 5. As próximas etapas de caracterização incluem a análise dos espectros RBS das amostras com a finalidade de verificar a estequiometria obtida e também a espessura dos filmes. E,também, o levantamento do espectro de transmitância para os filtros projetados no capítulo 5.

7.2.2 – Análise RBS dos filmes de TiO_x

Para a análise do espectro RBS das amostras de filme de TiO_x foi empregado o *software* SIMNRA© 4.4, obtido em versão *shareware* a partir do seu *site* na *internet*. O SIMNRA é usualmente empregado para a análise dos espectros RBS em substituição ao *software* RUMP quando o mesmo não apresenta uma modelagem adequada, como é o caso quando se emprega energia de feixe alta o suficiente para que ocorram ressonâncias, para os elementos em análise, devido a reações nucleares (veja descrição do programa SIMRA no Apêndice IV).

Para o presente estudo, as análises RBS foram conjugadas com as obtidas por espectrofotometria para procurar-se obter o valor da concentração planar total e da espessura dos filmes depositados. Como sabemos, espessura e índice de refração são as duas variáveis que podemos controlar quando da implementação de um filtro de interferência, assim é imprescindível que saibamos os seus valores, da forma mais exata possível, para que o projeto do filtro adequado possa ser conduzido.

Foi necessária a conjugação de ambas as técnicas para a obtenção da espessura dos filmes, pois a espectrofotometria apresenta valores duvidosos quando o espectro de transmitância possui poucos picos (amostras mais finas), e também porque a concentração planar total[6] realmente medida pelo RBS é apresentada em termos de átomos por unidade de área, valor esse que só pode ser convertido para as unidades usuais de espessura se tivermos o valor exato da densidade do filme, informação da qual não dispomos.

A metodologia empregada para a determinação da espessura dos filmes consistiu pois no levantamento de uma "reta de calibração" onde procuramos correlacionar os

[6] Na verdade, o parâmetro obtido nas análises RBS é a concentração planar, que é proporcional à espessura do filme.

valores de concentração planar total obtidos através do RBS com os valores julgados corretos obtidos por espectrofotometria das amostras mais espessas de TiO_x.

A seqüência de figuras a seguir (79 a 86) apresenta alguns dos espectros RBS levantados para um conjunto de amostras previamente analisadas através da técnica de espectrofotometria, sendo que a figura 78 apresenta o espectro do substrato de vidro utilizado. Sem a determinação da composição estequiométrica do substrato, não haveria precisão alguma quando da extração de parâmetros relativos ao filme de TiO_x depositado sobre ele.

A partir da simulação SIMNRA, apresentada juntamente com o gráfico experimental na figura 78, foi levantada a composição estequiométrica do substrato de vidro empregado em todo esse trabalho. A tabela 25 sumariza os resultados encontrados.

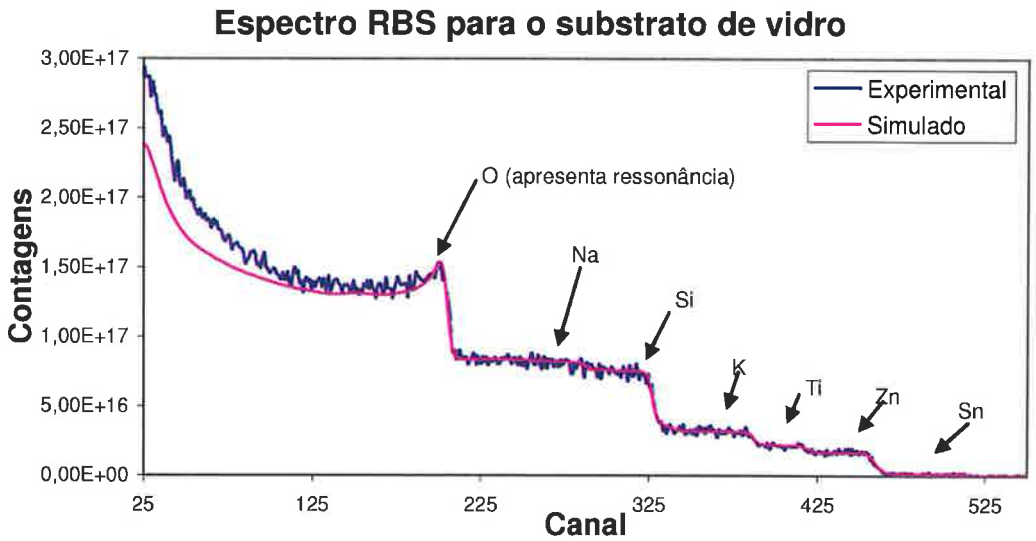


Fig. 78: Espectros RBS, experimental e simulado, para substrato de vidro.

Tab. 24: Composição estequiométrica do substrato de vidro.

Elemento	Concentração [%]	Estequiometria (Si = 1)
O	0,62642	2,441
Na	0,05094	0,199
Si	0,25659	1,000
K	0,03226	0,126
Ti	0,01233	0,048
Zn	0,02078	0,081
Sn	0,00066	0,003

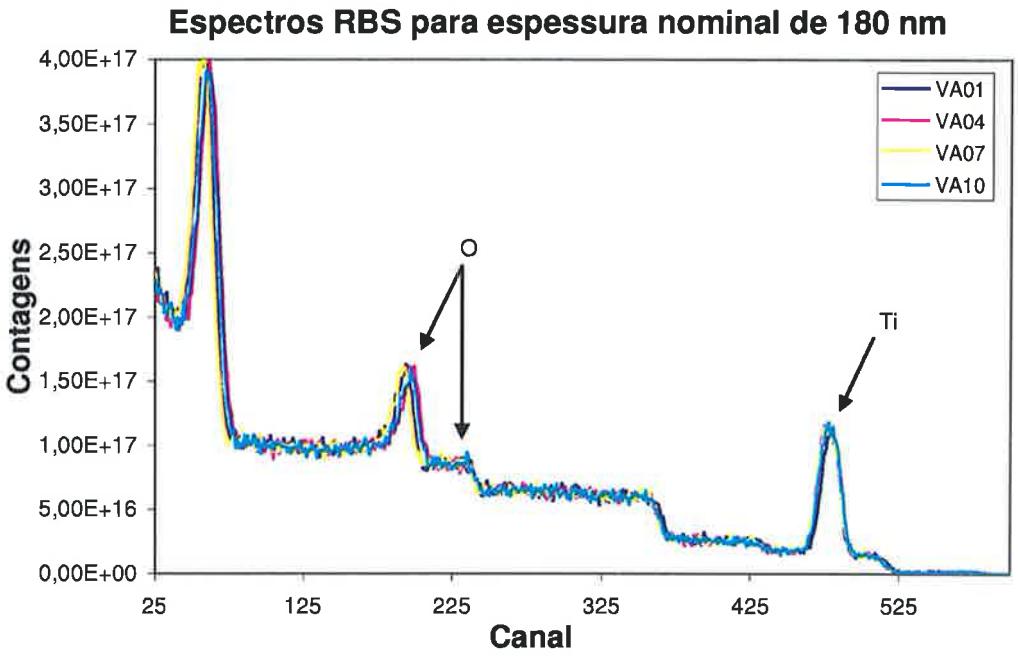


Fig. 79: Espectros RBS para amostras de espessura nominal de 180nm.

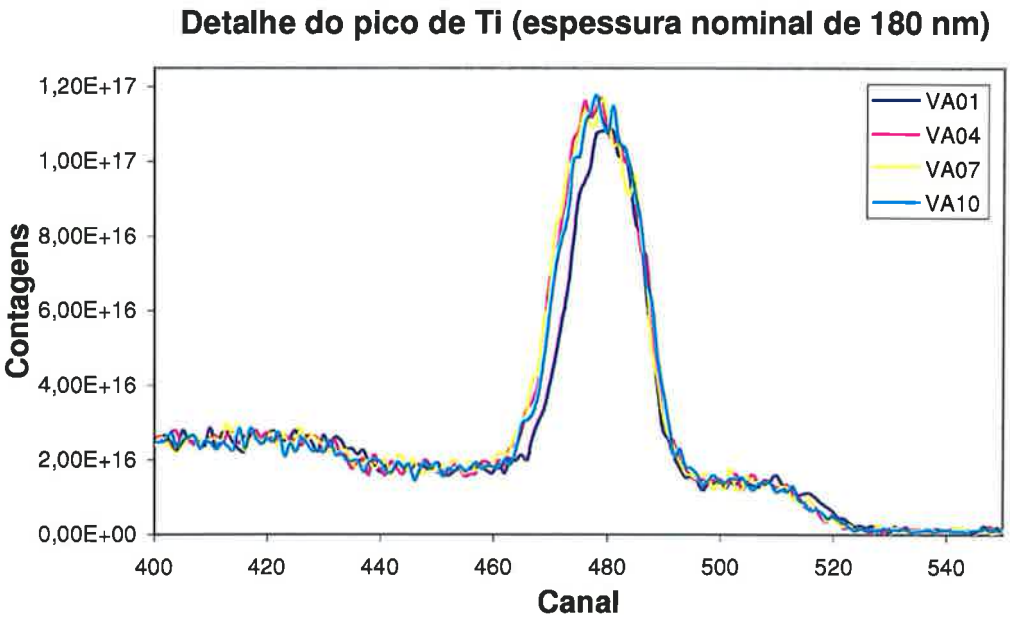


Fig. 80: Detalhe do pico de Ti relativo à figura 79. Repare como varia a espessura para a posição 01.

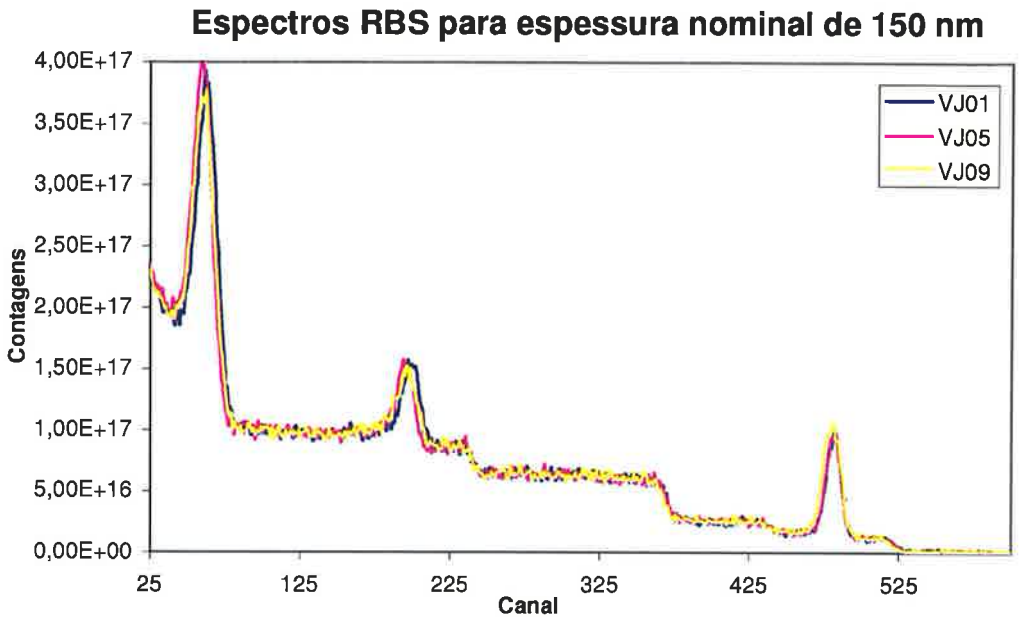


Fig. 81: Espectros RBS para amostras de espessura nominal de 150nm.

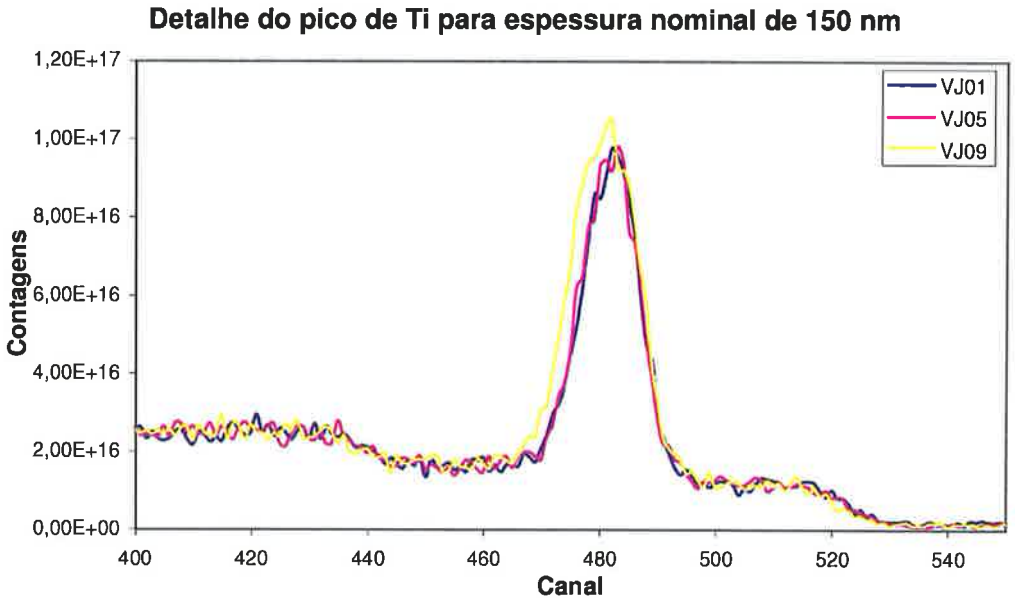


Fig. 82: Detalhe do pico de Ti, relativo à figura 81.

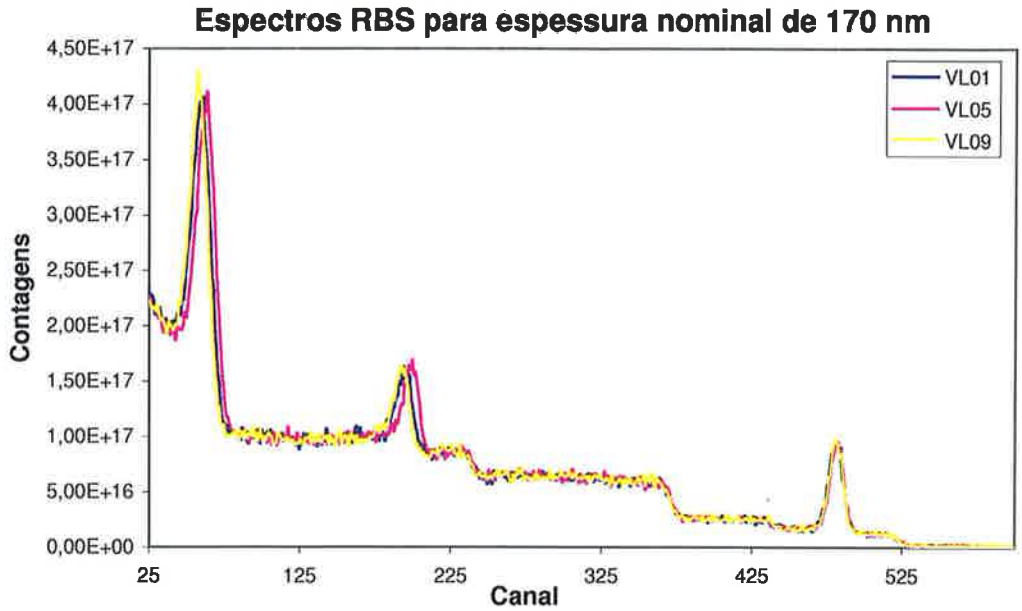


Fig. 83: Espectros RBS para amostras de espessura nominal de 170nm.

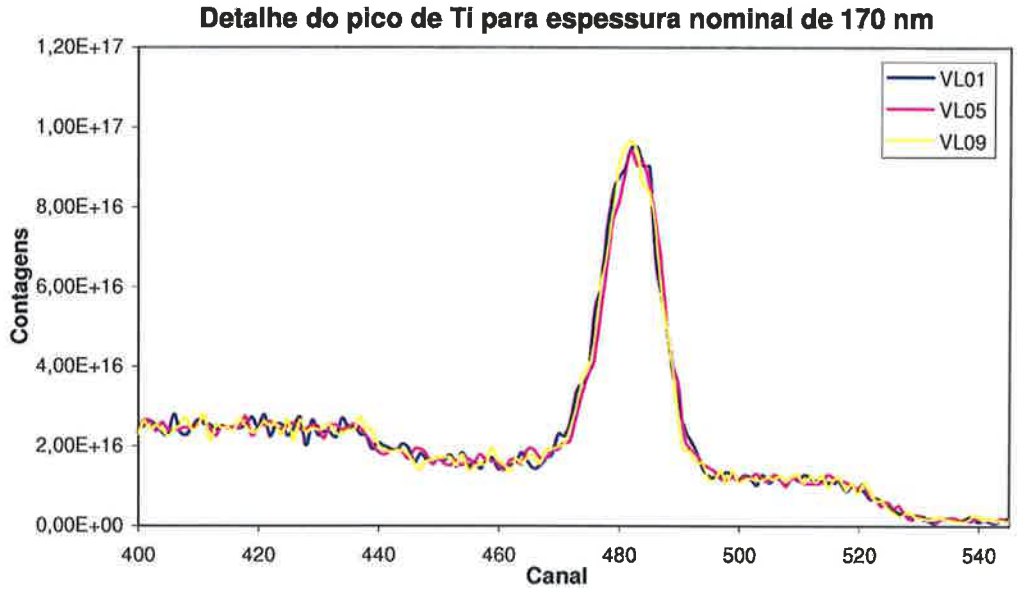


Fig. 84: Detalhe do pico de Ti relativo à figura 83.

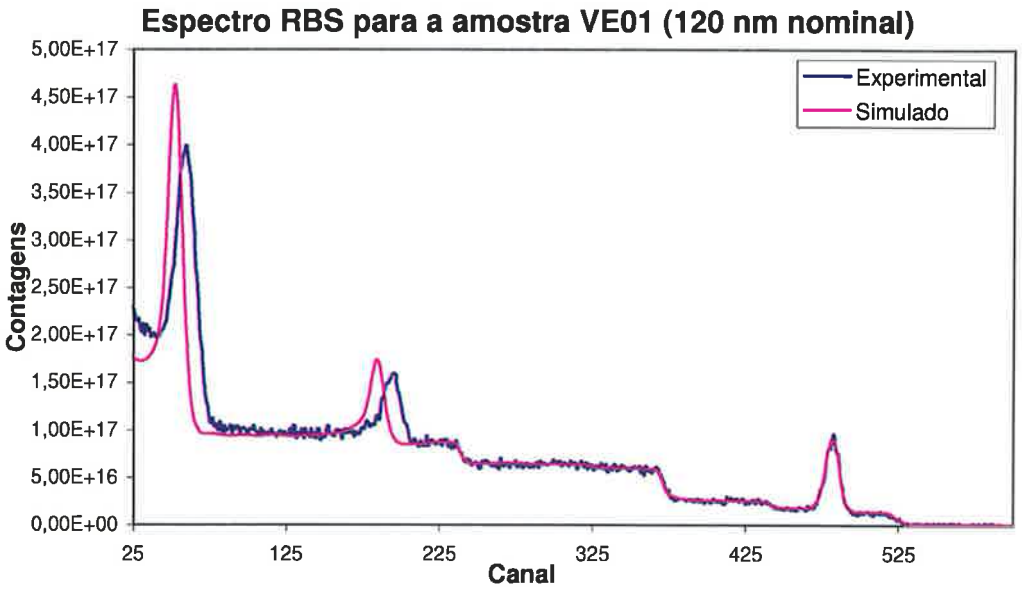


Fig. 85: Espectros experimental e simulado para a amostra VE01 (espessura de 120nm nominal).

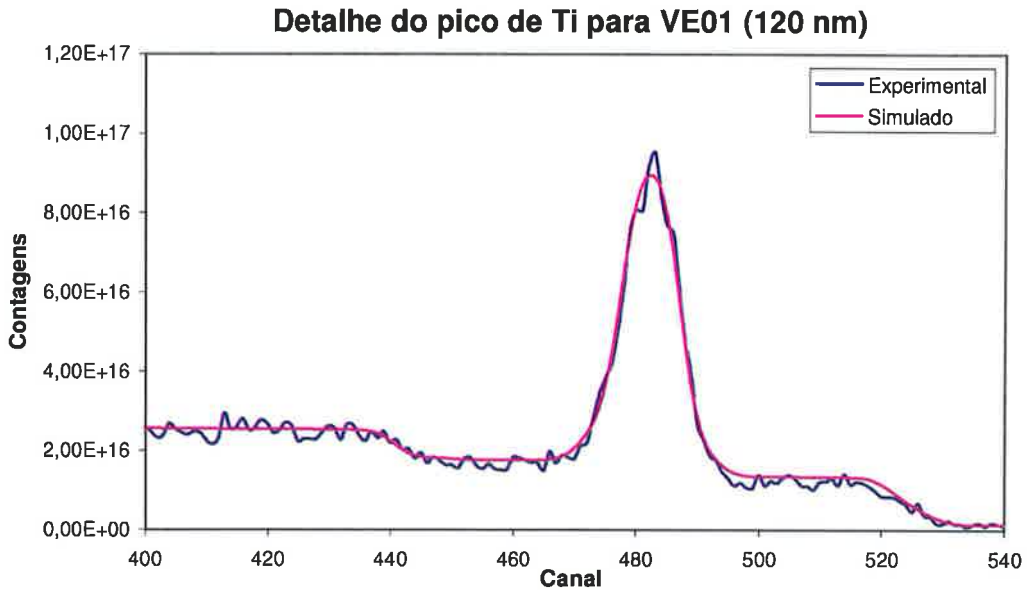


Fig. 86: Detalhe do pico de Ti relativo à figura 85.

Tab. 25: Dados resultantes das análises por RBS e espectrofotometria.

Pos.	Amostra	Espessura Nominal [nm]	Esteq. [O/Ti]	Espessura Espectr. [nm]	Espessura RBS [$1 \cdot 10^{15}/cm^2$]	Espessura normal. (lin.) [nm]	Índices de refração para cada λ					
							458	458_90	550	550_90	633	633_90
01	VA01	180	1,76	1904,58	1100,45	1724,80	2,4526	—	2,4727	—	2,4854	—
04	VA04	180	1,75	1847,58	1327,06	1799,24	2,4390	—	2,4350	—	2,4305	—
07	VA07	180	1,76	1827,86	1316,01	1795,61	2,4556	—	2,4536	—	2,4503	—
10	VA10	180	1,79	1843,87	1325,80	1798,83	2,4392	—	2,4354	—	2,4308	—
01	VB01	180	1,79	1857,71	1104,73	1726,21	2,4515	2,4605	2,4622	2,4717	2,4681	2,4780
04	VB04	180	1,77	1830,61	1364,82	1811,64	2,4499	2,4576	2,4418	2,4469	2,4339	2,4369
07	VB07	180	1,77	1794,98	1352,49	1807,59	2,4711	2,4987	2,4603	2,4820	2,4500	2,4670
10	VB10	180	1,72	1802,16	1327,07	1799,24	2,4650	2,4932	2,4553	2,4771	2,4459	2,4627
01	VD01	180	1,84	1817,78	1142,04	1738,46	2,4712	2,4592	2,4771	2,4691	2,4793	2,4745
04	VD04	180	1,70	1780,69	1276,24	1782,55	2,4729	2,4694	2,4597	2,4586	2,4474	2,4482
07	VD07	180	1,76	1795,33	1311,40	1794,10	2,4662	2,4735	2,4557	2,4624	2,4457	2,4519
10	VD10	180	1,86	1808,17	1380,89	1816,92	2,4630	2,4614	2,4522	2,4512	2,4420	2,4414
01	VJ01	150	1,97	1161,60	807,86	1628,68	2,3877	2,3900	2,3676	2,3705	2,3500	2,3535
01	VJ05	150	1,98	1144,35	815,98	1631,35	2,3983	2,3960	2,3779	2,3768	2,3602	2,3602
01	VJ09	150	1,97	1186,19	1019,87	1698,33	2,3921	2,3937	2,3738	2,3751	2,3579	2,3589
01	VL01	170	1,84	1069,11	751,21	1610,07	2,4285	2,4251	2,4066	2,4040	2,3874	2,3856
01	VL05	170	2,02	1069,34	763,11	1613,98	2,4317	2,4376	2,4137	2,4192	2,3980	2,4033
01	VL09	170	1,72	—	699,42	1593,06	—	—	—	—	—	—
01	VE01	120	1,99	1012,03	715,93	1598,48	2,4503	2,4190	2,4279	2,3978	2,4085	2,3793

A tabela 26 apresenta o conjunto de dados obtidos através das técnicas de espectrofotometria e de RBS, e na tabela 27 temos os dados empregados para o levantamento da reta de calibração de espessuras.

Tab. 26: Correlação entre as espessuras dos filmes de TiO_x obtidas por RBS e espectrofotometria.

Pos.	Amostra	Esteq.	Espessura Espectrof. [nm]	Concentr. planar [$1 \cdot 10^{15}/cm^2$]	Espessura Normalizada (linear) [nm]	Espessura Normalizada (log) [Å]
01	VA01	1,79	1904,58	1100,45	1724,80	1717,59
04	VA04	1,75	1847,58	1327,06	1799,24	1799,42
07	VA07	1,76	1827,86	1316,01	1795,61	1795,76
10	VA10	1,79	1843,87	1325,80	1798,83	1799,00
01	VB01	1,79	1857,71	1104,73	1726,21	1719,29
04	VB04	1,77	1830,61	1364,82	1811,64	1811,68
07	VB07	1,77	1794,98	1352,49	1807,59	1807,71
10	VB10	1,72	1802,16	1327,07	1799,24	1799,42
01	VD01	1,84	1817,78	1142,04	1738,46	1733,80
04	VD04	1,70	1780,69	1276,24	1782,55	1782,35
07	VD07	1,76	1795,33	1311,40	1794,10	1794,23
10	VD10	1,86	1808,17	1380,89	1816,92	1816,79

A simples observação da tabela 27 já é suficiente para que se perceba uma irregularidade: as amostras de posição 01 apresentam maior espessura medida pelo espectrofotômetro, mas ao mesmo tempo, apresentam as menores concentrações planares.

De fato, os espectros de transmitância para essas amostras apresentam um comportamento que se esperaria de um filme mais fino, a despeito do que a medida revela, e concordando assim com os valores obtidos por RBS. Assim, preferimos

empregar, para a determinação da reta de calibração, apenas as amostras que não pertencem à posição 01. Ainda assim, quando foi feito o gráfico correspondente, o mesmo apresentava uma grande dispersão (alta variância) que pôde ser bastante reduzida quando eliminamos os pontos provenientes das amostras VA.O gráfico final, bem como as curvas de tendência, linear e logarítmica, melhor ajustadas podem ser vistos na figura 87.

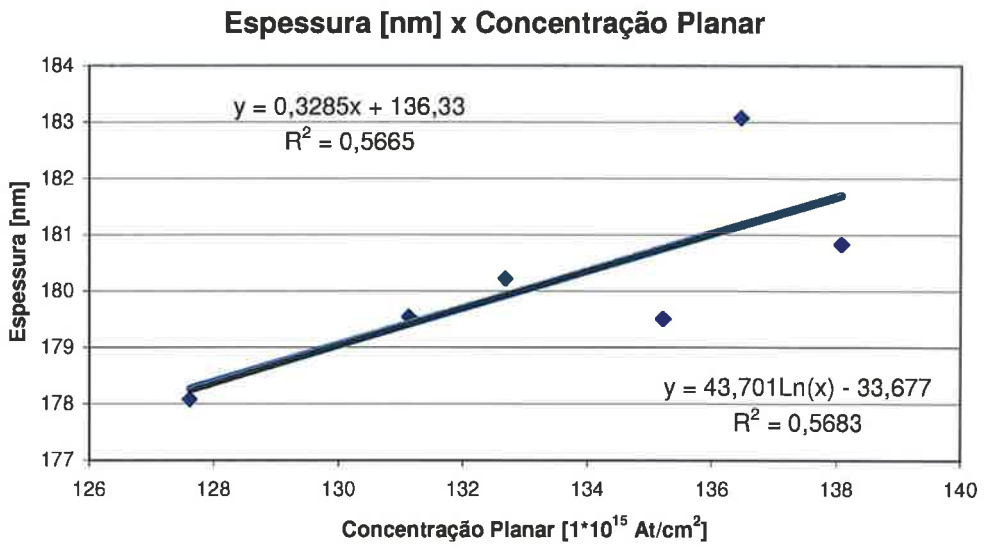


Fig. 87: Correlação entre as medidas de espessura efetuadas por RBS e espectrofotometria.

As duas últimas colunas da tabela 27 foram calculadas a partir das equações deduzidas do gráfico da figura 87.

Apesar de muito semelhantes os valores de espessura obtidos por aproximação linear e logarítmica para as amostras apresentadas na tabela 27, a diferença tende a crescer muito em função da variação da concentração planar, e apesar da aproximação linear nitidamente superestimar os valores de espessura quando a espessura RBS decresce, decidimos optar pela mesma já que os filtros de interferência foram projetados para espessuras próximas de 160nm, onde acreditamos que a aproximação linear é ainda bastante razoável.

Uma vez que dispomos de boas aproximações para as espessuras de cada amostra, é possível agora correlacionarmos tais valores com outras propriedades dos filmes de TiO_x, tais como suas estequiometrias e índices de refração.

Com isso pretendemos observar a variação dessas grandezas em função da espessura, mas podemos também observar o efeito que o ângulo de deposição exerce sobre as características dos filmes. A tabela 28 apresenta os valores de estequiometria média em função de suas posições durante a deposição. A figura 88 exibe o gráfico equivalente.

Tab. 27: Estequiometria das amostras em função do ângulo de deposição.

Posição	Ângulo de deposição	Estequiometria média	Desvio padrão
01	21,0°	1,89	0,11
04 / 10	28,0°	1,76	0,06
07	32,5°	1,76	0,01
Geral	—	**1,83**	**0,11**

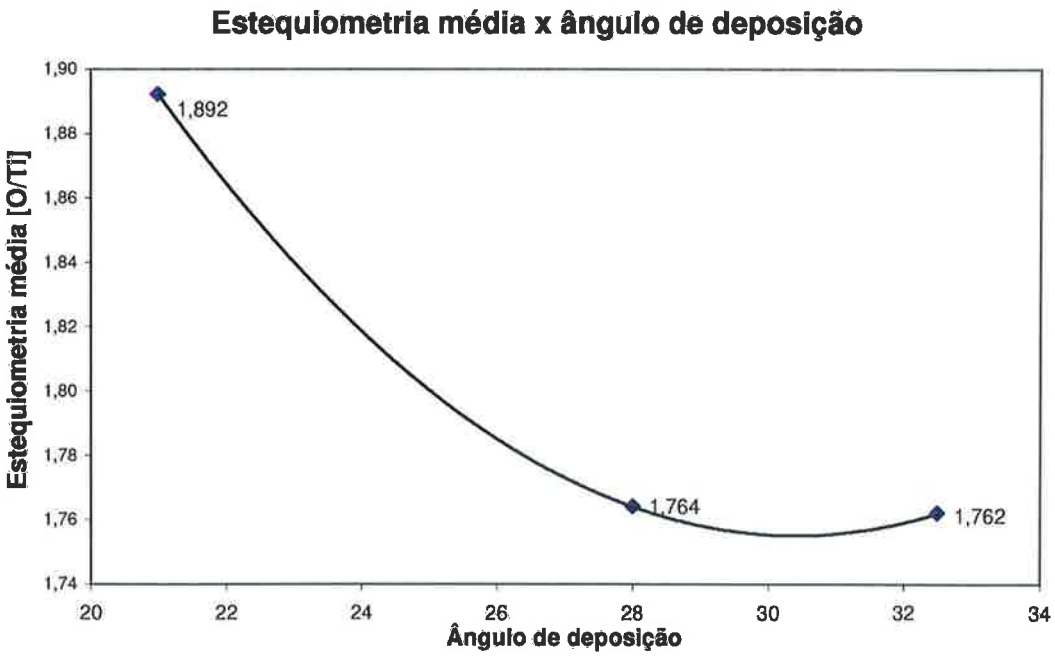


Fig. 88: Estequiometria média em função do ângulo de deposição.

O comportamento expresso no gráfico da figura 88 indica que a proporção de Ti em relação ao O aumenta com o aumento do ângulo de deposição, ou seja, o filme torna-se menos estequiométrico. Por outro lado, mantido o ângulo de deposição constante, a estequiometria também varia em função da espessura do filme conforme se vê no gráfico da figura 89.

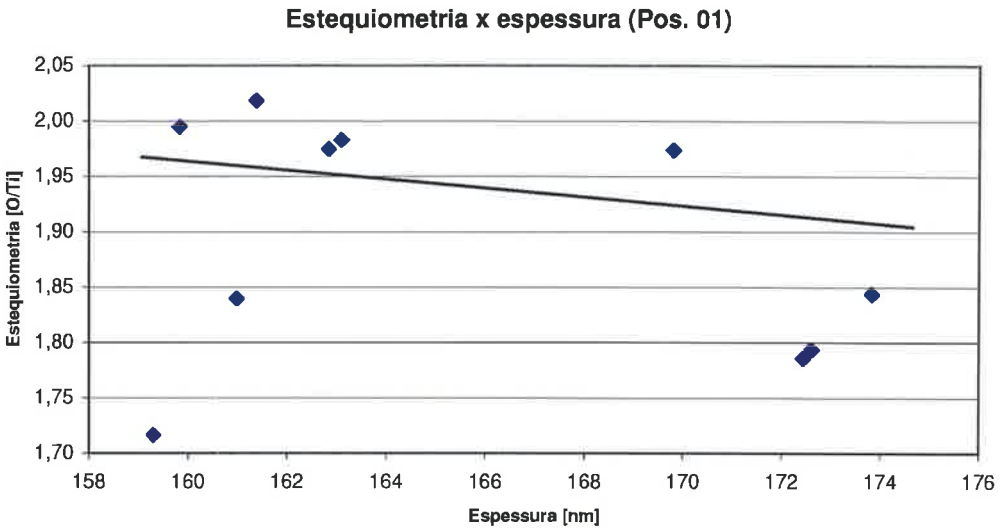


Fig. 89: Estequiometria em função da espessura do filme para amostras da posição 01.

A variação de estequiometria observada no gráfico da figura 89 pode ser explicada talvez por uma variação de densidade do filme depositado. Isso pode implicar numa variação da taxa de deposição ao longo do tempo de processo.

Para efeito de visualização dos parâmetros dos filmes em função da espessura, a utilização da reta de calibração aqui empregada é suficiente. No projeto dos filtros de interferência, consideramos a reta de calibração da figura 87 confiável no entorno de 160nm. Passamos a empregar apenas a concentração planar nos gráficos apresentados nas próximas secções.

7.3 – Caracterização dos filtros de interferência

As secções anteriores trataram da caracterização dos filmes de TiO_x depositados sobre os substratos de vidro. Nas secções seguintes serão apresentados

os dados relativos à caracterização dos filtros Fabry-Perot como um todo. As caracterizações dos filmes serviram como etapas prévias de extração de parâmetros para o devido projeto dos mesmos conforme mostrado no capítulo 5.

Foram implementadas diversas corridas sendo que muitas delas foram mal sucedidas. Nesse item, serão apresentados dados apenas para os filtros bem-sucedidos, em termos de polarização da luz transmitida, e para os filtros não-polarizadores, a título de comparação. O Anexo III apresenta todo o conjunto de filtros fabricados incluindo os possíveis motivos dos sucessos e insucessos.

7.3.1 – Espectrofotometria dos filtros de interferência

Para essa análise, vamos nos concentrar nas amostras de apenas duas receitas (veja capítulo 6), as receitas 02, de filtros não-polarizadores, e 03, de filtros polarizadores.

As figuras 90 e 91 apresentam os espectros de amostras típicas dessas receitas e a figura 92 faz uma sobreposição dos mesmos.

Como vemos, especialmente pela figura 92, as diferenças entre as corridas que geraram filtros polarizadores para aquelas que não o geraram, vão além da capacidade de polarização da luz, revelando-se também em diferenças de transmitância e localização do pico.

Os filtros não-polarizadores apresentam picos de transmitância máxima para comprimentos de onda ligeiramente diferentes sem, contudo, conseguir atenuar nenhum deles. O efeito geral, então, é o de apenas deslocar o comprimento de onda que apresentará a máxima transmitância (como visto nas simulações no capítulo 4).

Já no caso dos filtros polarizadores, há uma efetiva atenuação para um dos estados de polarização da luz, fazendo com que a luz que atravessar o filtro apresente um certo nível de polarização que dependerá das características do filtro.

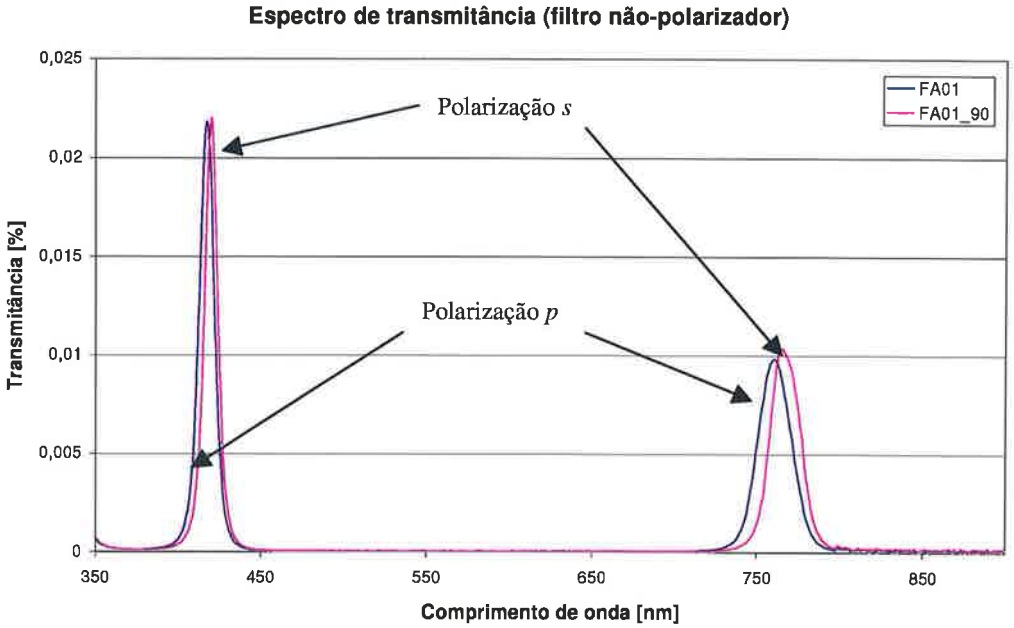


Fig. 90: Espectro de filtro não-polarizador.

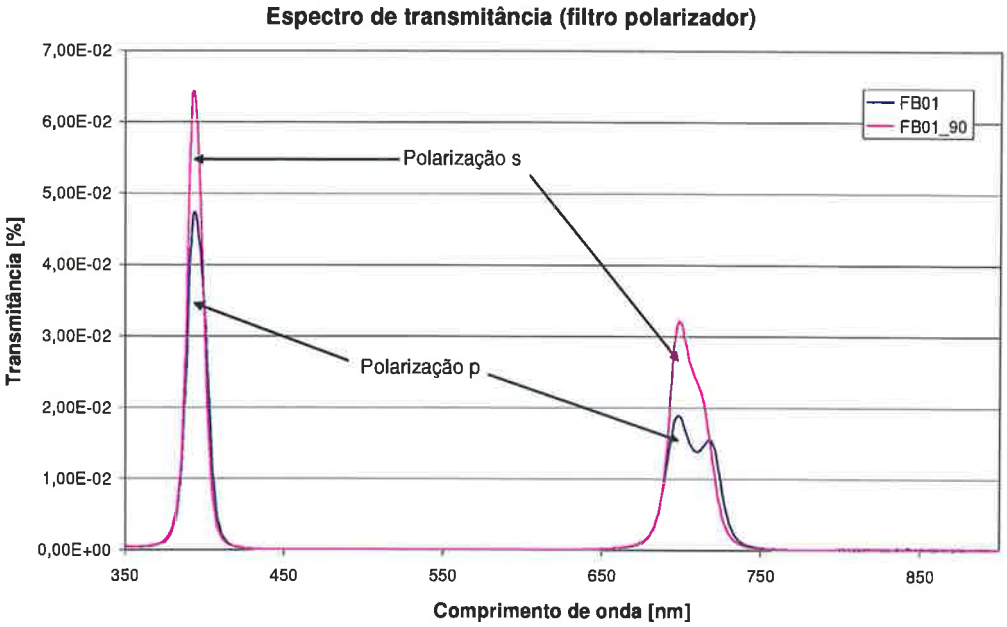


Fig. 91: Espectro de filtro polarizador.

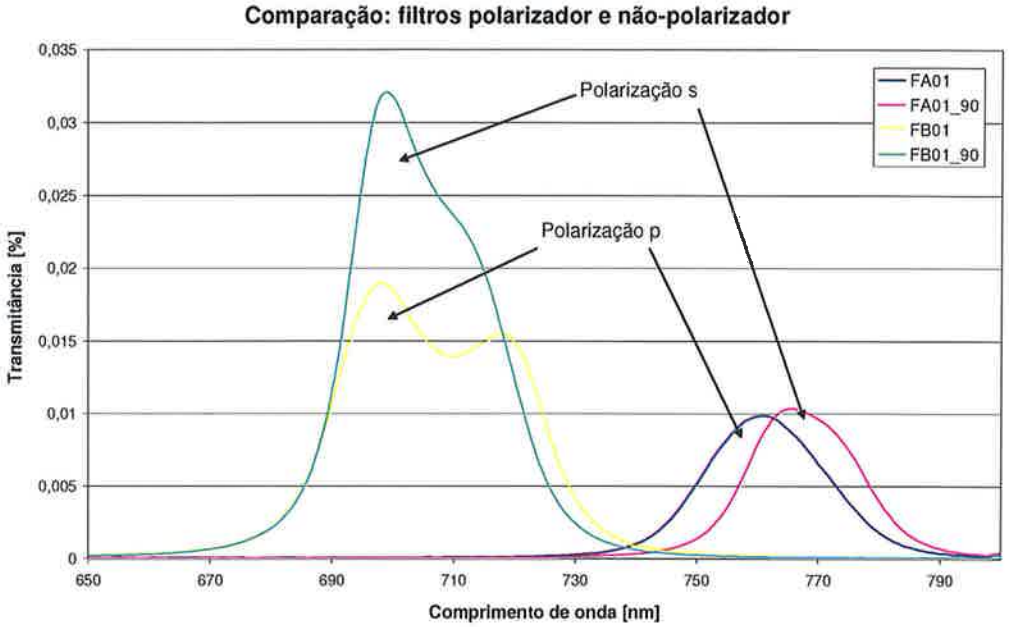


Fig. 92: Sobreposição dos espectros de filtros polarizadores e não-polarizadores.

A tabela 29 apresenta alguns parâmetros para o filtro polarizador extraídos a partir do gráfico da figura 92.

Tab. 28: Parâmetros do filtro polarizador. RC é a rejeição à componente ortogonal em relação ao tipo do filtro.

Parâmetros	Polarização *p*	Polarização *s*
$\lambda_{máx}$	699	698
T_{pico}	0,0320	0,0188
RC	1,702 (T_s / T_p)	
Tipo	S	

Pelos resultados apresentados na tabela 29, o filtro polarizador aqui implementado apresenta transmitância preferencial para o tipo *s*, sendo esta ~1,7 vezes superior à transmissão para polarização *p*.

7.3.2 – Análise RBS dos filtros de interferência

Da mesma forma que para a análise dos filmes de TiO_x, a técnica de RBS foi empregada aqui para o levantamento da estequiometria e concentração planar dos filtros como um todo.

A energia utilizada nas análises foi de 2,9 MeV, suficientemente alta para promover uma melhor separação entre os picos, mas também para gerar reações nucleares que resultam no fenômeno da ressonância para alguns elementos, como o oxigênio, por exemplo. Por esse motivo, as análises aqui efetuadas utilizaram o *software* SIMNRA® e não o RUMP®.

As figuras 93 e 94 apresentam os espectros RBS para os filtros implementados.

Os espectros RBS, tanto dos filtros polarizadores, quanto dos não-polarizadores, são aparentemente indistinguíveis, o que não é de se estranhar dado que a única diferença entre as receitas é apenas a rotação entre as deposições das duas cavidades ressonantes, além talvez, de variações de espessura devidas à tolerância nas variáveis de processo.

Independentemente da receita testada, invariavelmente só conseguimos filtros com características minimamente funcionais nas amostras depositadas na posição 01 (veja figura 61 no capítulo 6).

Se olharmos o espectro da figura 95, teórico e experimental, para um filtro polarizador, mas cuja amostra não foi depositada na posição 01, veremos que o mesmo apresenta-se bastante irregular no que se refere à definição dos picos e bem diferente do espectro para a posição 01.

Certamente, a falta de definição nas camadas de Ag e TiO_x foram a causa para o comportamento anômalo desses filtros (veja Anexo III), e a falta de definição em si pode ser explicada por uma possível interpenetração das camadas depositadas, ocorrência essa só verificada para ângulos de deposição maiores (fora da posição 01).

Observando os gráficos da figura 96, vemos que houve uma grande dispersão nos valores de concentração planar, que é diretamente proporcional à espessura do filme, e também no valor da estequiometria dos filmes, mesmo se considerarmos as variações de uma camada para a outra.

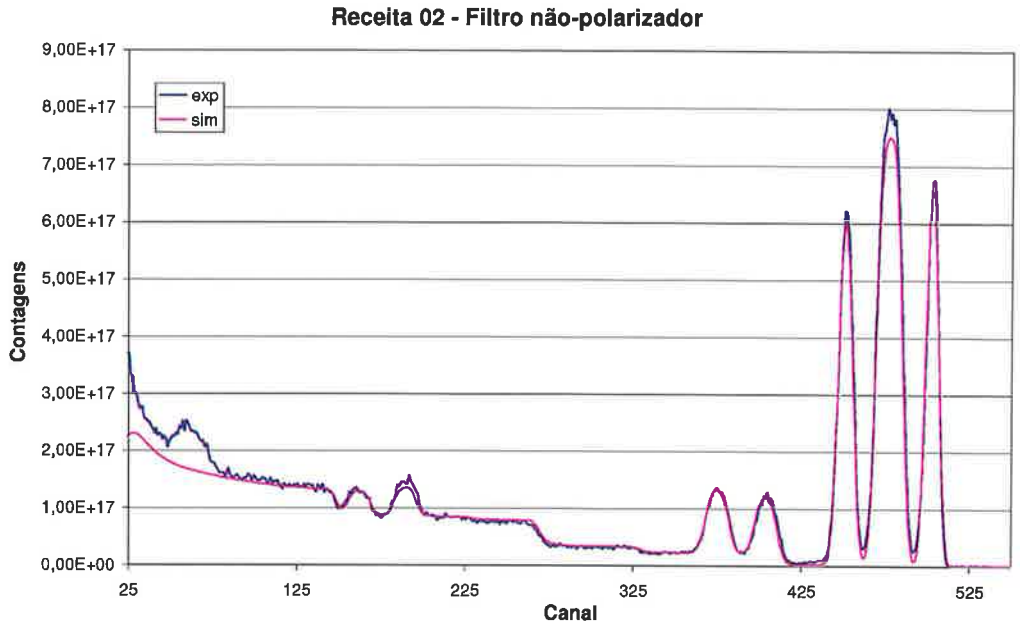


Fig. 93: Espectro RBS para filtro não-polarizador. Posição 01.

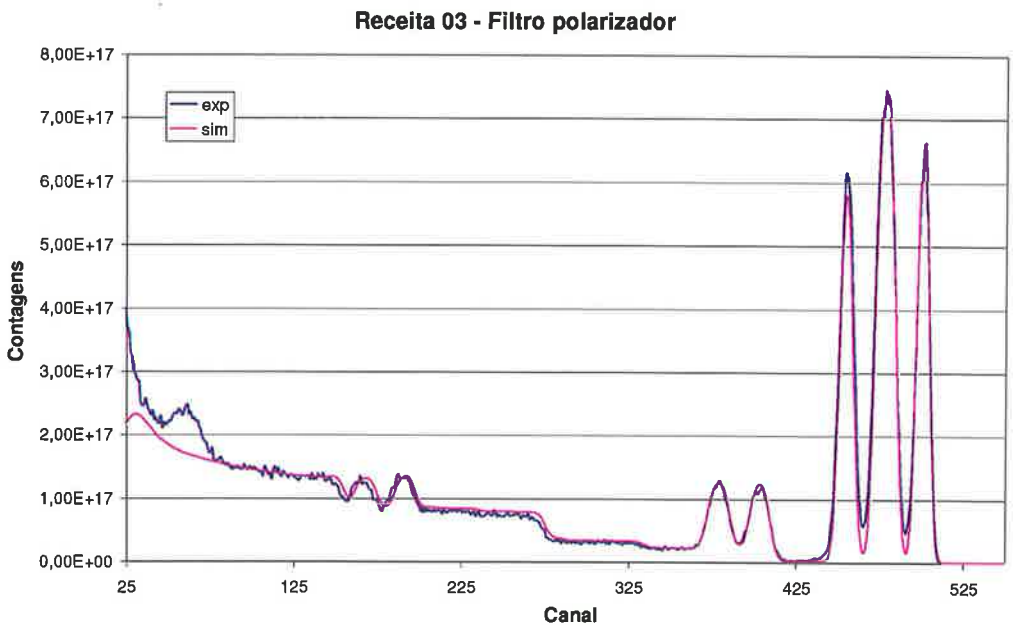


Fig. 94: Espectro RBS para filtro polarizador. Posição 01.

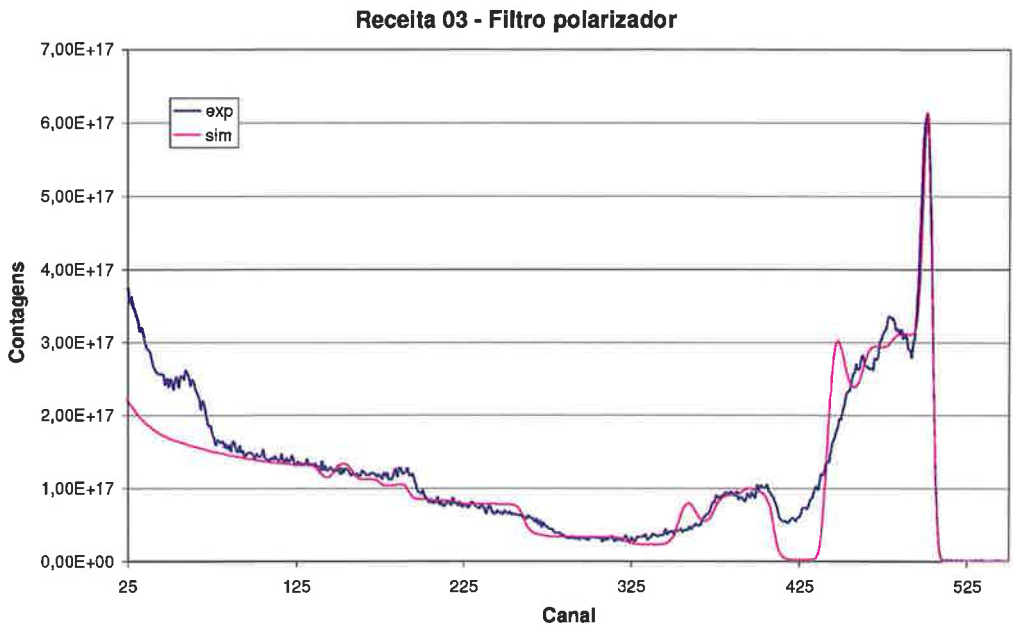


Fig. 95: Espectro RBS para filtro polarizador mas a amostra foi posicionada fora da posição 01.

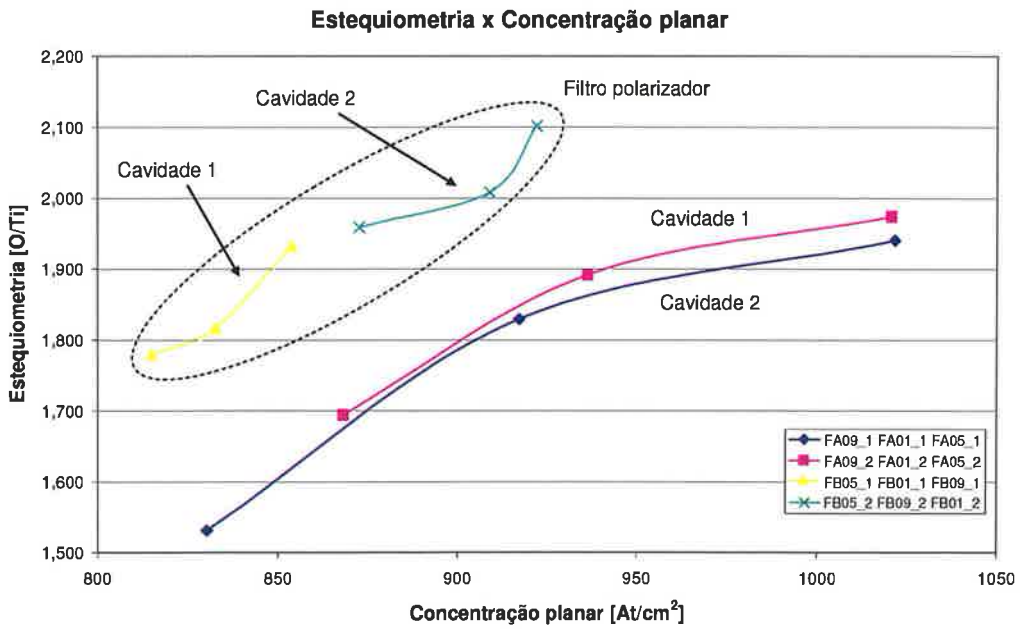


Fig. 96: Estequiometria x concentração planar, de ambas as cavidades, para filtros polarizadores e não-polarizadores.

Da figura 96, é possível concluir que o equipamento de *Sputtering* empregado, um sistema de malha aberta, não apresenta as características necessárias, em termos de controle, para produzir filtros polarizadores com características reprodutíveis.

Explica-se isso por um possível valor alto para o coeficiente de extinção do filme de TiO_x, ou seja, a parte imaginária do índice de refração (veja simulações no Anexo III), que afeta tanto o valor máximo de transmitância, quanto à própria relação entre os valores de transmitância para cada componente de polarização, ou talvez pela simples variação nas características de uma camada de ressonância para a outra.

Um valor alto para o coeficiente de extinção poderia ser explicado, por sua vez, por uma relação estequiométrica menor do que 2, ou seja, com excesso de metal no filme.

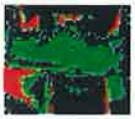
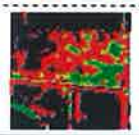
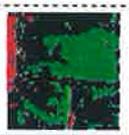
7.3.3 – Caracterização funcional dos filtros de interferência

Para a averiguação da capacidade de polarização associada aos filtros implementados (figuras 90 e 91), empregamos a montagem para obtenção de PDI's com uma câmera, já descrita no início deste capítulo, na qual fizemos passar luz através dos filtros (iluminação traseira) e a recolhemos, após a passagem pelo polarizador, numa câmera, salvando as imagens para posterior processamento.

A título de comparação, vamos analisar os filtros FB (FB01 e FB05) (figura 91) e o filtro FA01 (figura 90), sendo este último não-polarizador.

Dada a baixa definição e o tamanho reduzido das imagens aqui obtidas (devido em parte à baixa resolução das câmeras e também ao tamanho físico dos filtros), ao invés de utilizarmos as imagens de diferença de polarização como elas foram apresentadas até agora, lançaremos mão de uma imagem "binária" em pseudocores destinada a realçar áreas que tenham algum nível de polarização. Assim, se uma região apresentar polarização na mesma direção do polarizador P, ela será colorida de vermelho. Se a região for S, ficará em verde. Regiões com baixo nível de polarização (diferença menor ou igual a 10 níveis de cinza, ou seja, 3,9% dos 255 níveis possíveis) serão representadas em preto.

Tab. 29: Caracterização funcional dos filtros implementados. As dimensões do substrato onde foi implementado o filtro são de 24 x 24 mm.

Amostra	Normal	Girada de 90°	Tipo
FB01			S
FB05			S
FA01			—

Notamos, pela área ocupada pelas manchas verdes nos filtros FB01 e 05, que eles são bons polarizadores em toda a sua extensão. A pequena área em preto se deve principalmente a variações de espessura e/ou estequiometria ao longo da lâmina, e talvez também à presença de defeitos no substrato que tenham, de alguma forma, prejudicado a aderência dos filmes sobre eles.

Observamos também que os filtros FB mantêm o tipo de polarização (S) independentemente da rotação de 90° aplicada. Isso se dá porque a polarização é decorrente da relação entre as espessuras e índices de refração dos filmes das cavidades ressonantes, que por sua vez, foram implementadas após uma rotação de 90° durante a etapa de implementação (veja capítulos 5 e 6).

Quanto ao filtro FA01, como ele não sofreu a rotação de 90° durante o processo construtivo, ele exibirá comportamentos diferentes (P para o primeiro caso e S para o segundo) dependendo do ângulo sob o qual ocorrer a incidência da luz. A primeira figura ainda, para a condição normal, apresenta uma distribuição bem semelhante de regiões verdes e vermelhas, o que reforça ainda mais a conclusão de que este filtro não apresenta propriedades polarizadoras.

7.3.4 – Caracterização elétrica dos filtros de interferência

O objetivo principal do presente trabalho foi o de conseguir filtros de interferência capazes de filtrar a luz transmitida não apenas em comprimento de onda, mas também em função do grau de sua polarização.

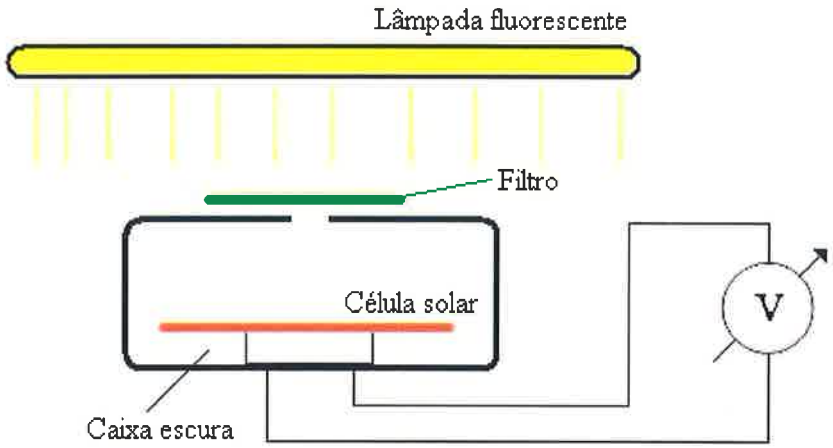


Fig. 97: Montagem experimental empregada para determinar a resposta elétrica dos sensores sob a ação dos filtros implementados.

A discriminação em termos de polarização é mais importante do que a necessidade da filtragem em comprimento de onda, sendo essa necessária apenas porque não é possível obter-se, com tecnologia de filtros de interferência, um polarizador igualmente funcional em todos os comprimentos de onda. Assim, a aplicabilidade dos filtros ora implementados deve necessariamente ser testada também em conjunção com o sensor através da resposta elétrica fornecida pelo mesmo. Para isso foi empregada a montagem experimental apresentada na figura 97. O sensor usado nessa experiência foi uma célula solar comercial, cuja tensão de saída foi medida por meio de um multímetro digital.

A caixa escura foi empregada para garantir que a única fonte de luz incidindo sobre a célula solar fosse a luz de uma lâmpada fluorescente passando através do filtro a ser testado.

As dimensões de interesse para esse experimento foram as seguintes:

Diâmetro do furo: 0,62 cm

Distância filtro-célula solar: 1,5 cm

Distância lâmpada-filtro: 0,8 cm

A distância entre a fonte de luz e a célula solar é pequena para compensar a pequena área de iluminação (0,38 cm^2), o que tenderia a gerar tensões muito baixas. Esse procedimento, no entanto, acaba por aquecer a célula solar. Como a tensão de uma célula solar tende a cair conforme a mesma é aquecida, deve-se efetuar medidas consecutivas apenas após um pequeno intervalo de tempo, necessário para que ela se resfrie.Isso posto, passemos à apresentação dos resultados. Os materiais empregados nesse experimento foram:

01 – Célula solar SINONAR SS-3012

01 – Multímetro digital MINIPA ET-1000

01 – Luminária Startec 9 W, luz branca

A tensão de escuro, ou seja, sem nenhuma luz incidindo sobre a célula solar foi determinada em 0,0 V, ou seja, toda tensão gerada é função unicamente da luz incidente (filtrada). A tensão em vazio (sem o filtro) foi determinada antes de cada novo filtro ser testado para compensar o fato da perda de tensão por aquecimento. Procurou-se manter um patamar fixo de tensão inicial. Os resultados são apresentados na tabela 31. Na primeira coluna são discriminadas as amostras testadas, apenas das receitas mais eficazes e de algumas outras para comparação.

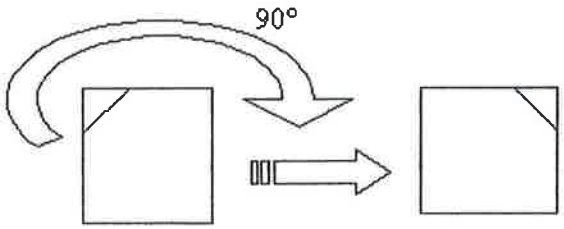


Fig. 98: Mudança de posicionamento do filtro para cada medida (pD → p90).

Foram medidas duas tensões para cada amostra (veja figura 98): a primeira com o filtro posicionado conforme foi depositado (coluna pD), e a segunda com o filtro girado de 90° com relação àquela posição (coluna p90).

Cada filtro em si ou atenua a luz com polarização *p* ou *s*, ou seja, ou ele é um filtro S ou P. As duas medidas aqui tomadas apenas ressaltam a sua birrefringência.

Tab. 30: Resultados da caracterização elétrico de uma célula solar associada aos filtros implementados. A tensão em vazio refere-se à medida sem o filtro.

Amostra	Vazio [V]	pD [mV]	p90 [mV]	pD – p90 [mV]	Atenuação [Vazio / média(p, s)]
FA05	2,57	30,5	30,5	0,0	84,3
FB01	2,59	50,8	47,8	3,0	52,5

Dos resultados apresentados na tabela 31, a diferença de tensão para a amostra FA05 resultou nula devido ao filtro não ser polarizador. Com isso, a luz transmitida numa posição e noutra se equivalem levando a uma diferença nula.

8 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Ao iniciarmos este trabalho, propusemos o emprego de duas arquiteturas diferentes para a obtenção de imagens de diferença de polarização (PDI's). Uma delas, um sistema composto por duas câmeras e polarizadores, foi testada para a aplicação específica de detecção de alvos imersos em ambientes dispersivos.

Os resultados obtidos para este teste corroboraram os que foram reportados na literatura, ou seja, a utilização de PDI's é eficaz na visualização de objetos que reflitam ou transmitam a luz diferentemente, conforme o seu estado de polarização.

Dadas as limitações do sistema aqui testado, o alvo utilizado foi um filtro polarizador. Mas para aplicações reais, torna-se importante saber se objetos convencionais podem alterar o estado de polarização da luz, quer por reflexão, quer por transmissão. Sem isso, apesar de teoricamente possível, o uso de sistemas PDI torna-se inviável na prática.

Em função disso, foi introduzida aqui uma secção de simulação que demonstrou a capacidade de polarização da luz exibida tanto por metais quanto por dielétricos. Tal constatação nos permite concluir pela possibilidade prática da utilização de sistemas de visualização baseados em PDI.

Quanto ao segundo esquema aqui proposto, ele não foi completamente implementado, mas a sua principal estrutura, filtros polarizadores baseados em tecnologia de filmes finos birrefringentes, e que constituem o principal escopo to presente trabalho, foram aqui testados.

Os resultados mostraram a viabilidade de se obter filtros polarizadores por meio da utilização de filmes birrefringentes, filmes esses, por sua vez, que apresentam a característica da birrefringência devido ao fato de terem sido depositados sobre um substrato inclinado.

Também pudemos concluir que não é necessário o total cancelamento de um dos estados de polarização da luz quando da implementação de sistemas de imagens de diferença de polarização, bastando que o filtro empregado seja capaz de atenuar preferencialmente uma das componentes em detrimento da outra. Com isso, o saldo gerado poderá ser amplificado de modo a fornecer um sinal de amplitude adequada,

sendo que o sinal do mesmo (positivo ou negativo) servirá para discriminar o excesso de polarização (se *p* ou *s*) presente no sinal de entrada (luz incidente).

Também ficou demonstrado, através das caracterizações elétricas, que um filtro centrado em 700 nm pode ser empregado com sucesso no processo de filtragem em termos de polarização. A questão do posicionamento do pico de transmitância máxima prende-se mais às características do sensor do que a uma real necessidade no que se refere à discriminação dos níveis de polarização da luz. Assim, um filtro com pico em qualquer região onde o sensor apresente uma boa relação sinal/ruído poderá ser empregado, desde que nesse comprimento de onda as suas características de birrefringência (e, portanto capacidade de discriminação em polarização) sejam adequadas.

Além dos resultados dos testes efetuados, também foi aqui apresentado um estudo de caso de um sistema integrado, reportado na literatura, capaz de fazer a aquisição de imagens de diferença de polarização.

Tudo isso nos leva a apontar, como perspectiva para um futuro desenvolvimento deste trabalho, a possibilidade de se construir um sistema, também integrado, de aquisição de PDI's.

Esse sistema, ao empregar os filtros aqui testados, teria como vantagem sobre o que foi reportado na literatura, uma melhor capacidade de integração com os processos já praticados na indústria microeletrônica.

ANEXO I – Espectrofotometria

Dada a natureza deste trabalho, a determinação dos índices de refração (partes real e imaginária) dos filmes de TiO_x assume importância capital. Para isso foi estudada e empregada a técnica de espectrofotometria na região do infravermelho próximo ao ultravioleta próximo. Este primeiro anexo aborda a técnica de espectrofotometria e também o *software* implementado para, fazendo uso dela, extrair os parâmetros dos dados experimentais.

Essa análise foi efetuada utilizando-se o espectrofotômetro UV-VIS-NIR Cary 500 Scan, da Varian™, disponibilizado para uso pelo LACIFID (**LA**boratório de **C**ristais **I**ônicos, **FI**lmes finos e **D**atação) do Instituto de Física da USP.

A figura 99 mostra a montagem esquemática interna do espectrofotômetro. Obviamente, no equipamento real, as amostras ficam protegidas da exposição direta da luz ambiente numa câmara própria.

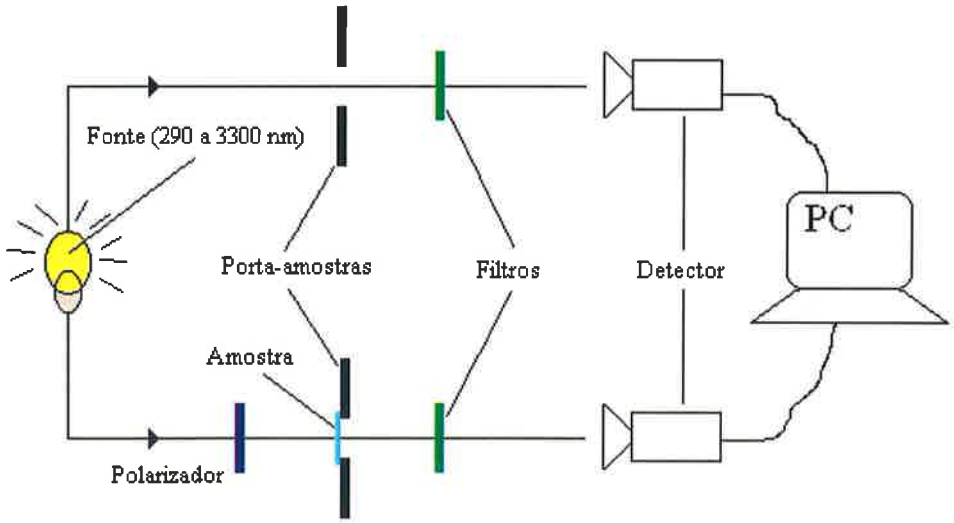


Fig. 99: Montagem esquemática empregada para a análise dos espectros de transmitância.

O espectrofotômetro funciona da seguinte maneira: a fonte emite um feixe de luz cujo comprimento de onda pode variar desde 3300 até 290 nm (a variação é no sentido do IR para o UV). Esse feixe é dividido em dois e por um dos braços atravessa a

amostra, enquanto que o outro feixe servirá de referência. A variação do comprimento de onda é feita (automaticamente pelo equipamento) ou trocando-se a fonte, ou o filtro ou o detector, sendo que onde houver alguma dessas trocas, teremos possivelmente um erro de continuidade introduzido na medida.

Os dados são armazenados num PC de onde podem ser salvos em formato .csv (*comma separated value*), formato esse que pode ser lido pelo Excel™ e também pelo *software* iRefrac, descrito mais à frente.

Antes de se fazerem as medidas propriamente, é necessário efetuar-se uma etapa "em branco", ou seja, sem a amostra. Isso é necessário para gerar uma *baseline* que será subtraída de cada um dos espectros medidos posteriormente. Com isso, anula-se o efeito do ar presente na câmara das amostras, e o espectro assim medido deve seu comportamento unicamente às propriedades ópticas da amostra.

Com relação a esse procedimento básico, esse trabalho exige uma pequena modificação que é o uso de um filtro polarizador (mostrado na figura 99), graças ao qual, é possível a medição do índice de refração conforme ele é visto pelo filme para cada polarização (p e s) da luz.

A técnica de espectroscopia ("método do envelope") se presta à medição da parte real do índice de refração e do coeficiente de extinção α da amostra para cada comprimento de onda, ou seja, é possível levantar-se o perfil do mesmo (Swanepoel, 1984; e Horowitz et al, 1994). Além disso, também é possível obter-se uma estimativa da espessura do filme, a partir da qual se pode extrair a parte imaginária do índice de refração.

A figura 100 ilustra o espectro para um filme qualquer (não se trata de um espectro real, mas a curva apresenta todas as suas características típicas).

O primeiro passo para a análise do espectro é a determinação de duas curvas que funcionarão como uma envoltória (envelope) para o espectro, uma delas sendo a curva de máxima transmitância e a outra a curva de mínima transmitância.

A partir dos valores dessas curvas para um dado comprimento de onda (vide figura 101), é possível a extração da parte real do índice de refração n como ilustrado nas equações A.1-1 e A.1-2.

O coeficiente α pode ser determinado por meio da equação A.1-3, também através do valor das envoltórias no ponto.

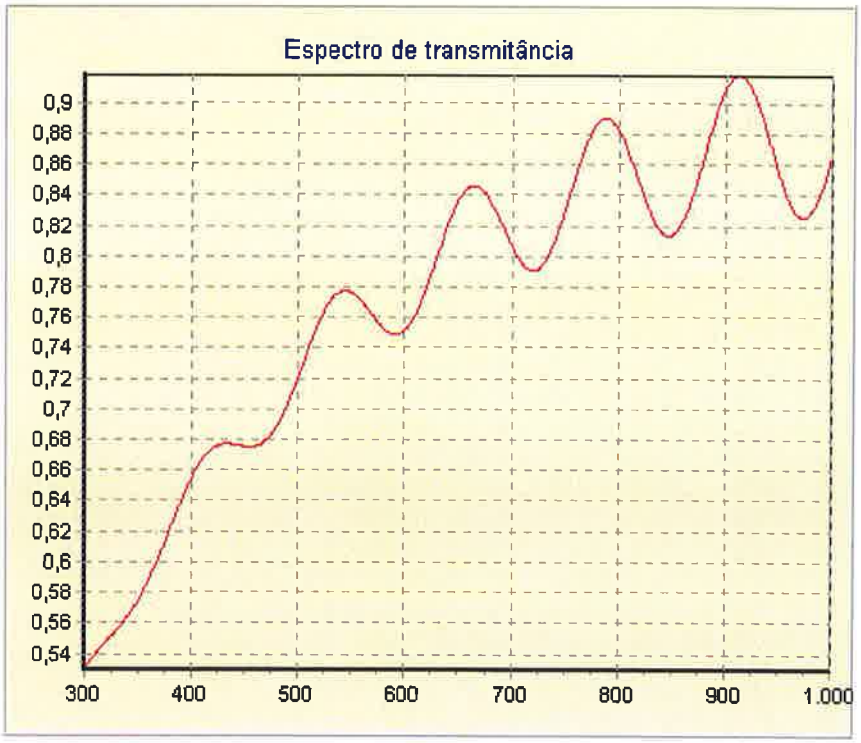


Fig. 100: Espectro de transmitância de um filme qualquer.

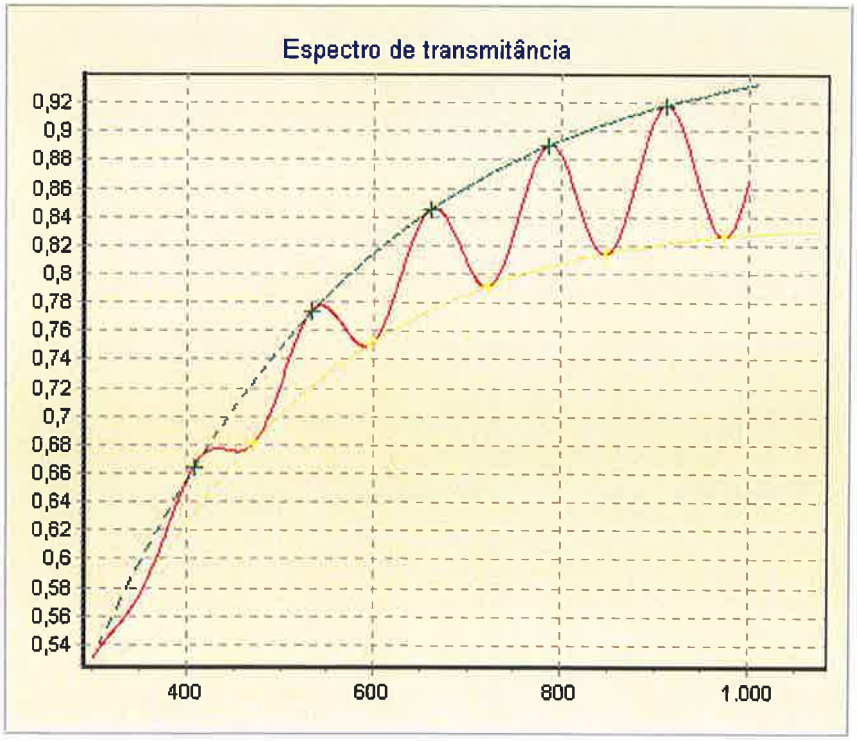


Fig. 101: Espectro e envelope. Em verde, curva de transmitância máxima e em amarelo a mínima.

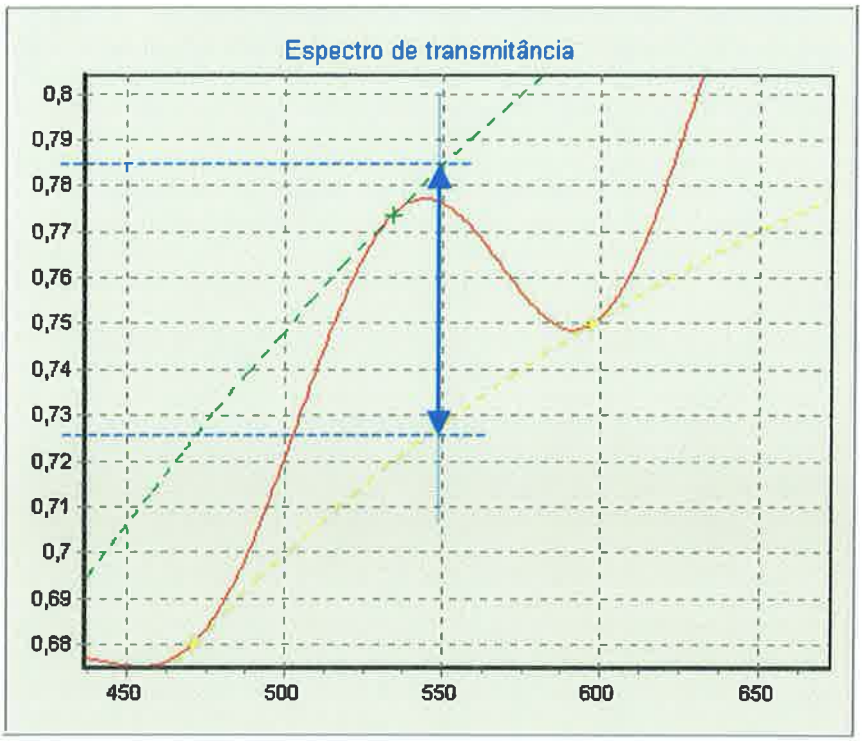


Fig. 102: Detalhe do espectro ilustrando o método de cálculo da parte real do índice de refração.

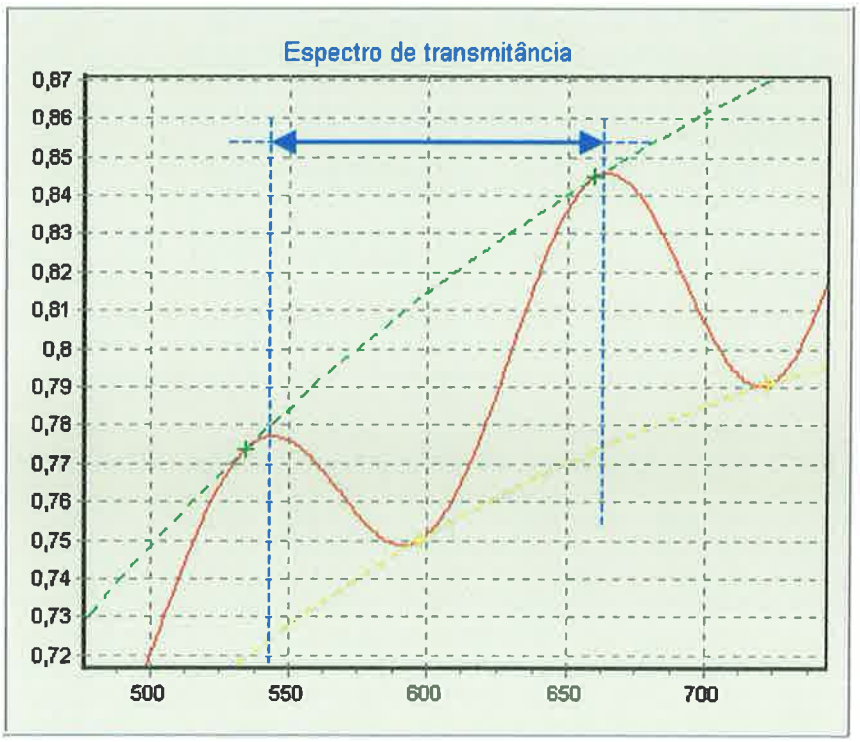


Fig. 103: Detalhe do espectro ilustrando o método para o cálculo da espessura do filme.

$$n = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - n_i^2 \cdot n_S^2}} \qquad \text{(A.1-1)}$$

$$N = 2 \cdot n_i \cdot n_S \cdot \frac{TM_0 - Tm_0}{TM_0 \cdot Tm_0} + \frac{n_S^2 + n_i^2}{2} \qquad \text{(A.1-2)}$$

onde TM_0 e Tm_0 são respectivamente os valores de transmitância máxima e mínima para um dado comprimento de onda, extraídos das envoltórias correspondentes, n_S é o índice de refração do substrato e n_i é o índice do meio onde ocorre a incidência da luz, no nosso caso é o ar e portanto $n_i = 1$.

$$\alpha = \frac{(n + n_i) \cdot (n_S + n)}{(n - n_i) \cdot (n_S - n)} \cdot \frac{1 - \sqrt{\frac{TM_0}{Tm_0}}}{1 + \sqrt{\frac{TM_0}{Tm_0}}} \qquad \text{(A.1-3)}$$

Para o cálculo da espessura do filme, deve-se saber antes o valor do índice de refração (parte real) em dois máximos (ou mínimos). A partir daí usa-se a equação A.1-4.

$$d = \frac{M \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot (n_1 \cdot \lambda_2 - n_2 \cdot \lambda_1)} \qquad \text{(A.1-4)}$$

onde M é igual a 1 se os picos forem consecutivos, 2 se houver apenas outro pico entre eles, e assim por diante, e n_1 e n_2 os valores dos índices de refração em cada um dos comprimentos de onda λ_1 e λ_2 referentes aos picos (vide figura 103).

A partir do valor de α é possível extrair a parte imaginária do índice de refração k por meio da equação A.1-5.

$$k = -\ln(\alpha) \frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \qquad \text{(A.1-5)}$$

onde d é a espessura do filme, determinada em A.1-4.

Assim, o hipotético filme cujo espectro está representado na figura 100 possui espessura de 854,12 nm, $\boldsymbol{n}$ = 1,78457 + i·0,00980 e α = 0,82598 para o comprimento de onda de 550 nm.

Para os cálculos foram admitidos incidência pelo ar e substrato de vidro, assim $n_i = 1$ e n_S foi extraído do gráfico da figura 104.

Visando-se automatizar os procedimentos de cálculo para a extração dos parâmetros a partir dos espectros coletados, foi implementado o *software iRefrac*, escrito em linguagem C++ na plataforma C++ Builder© da Borland™ (figura 105).

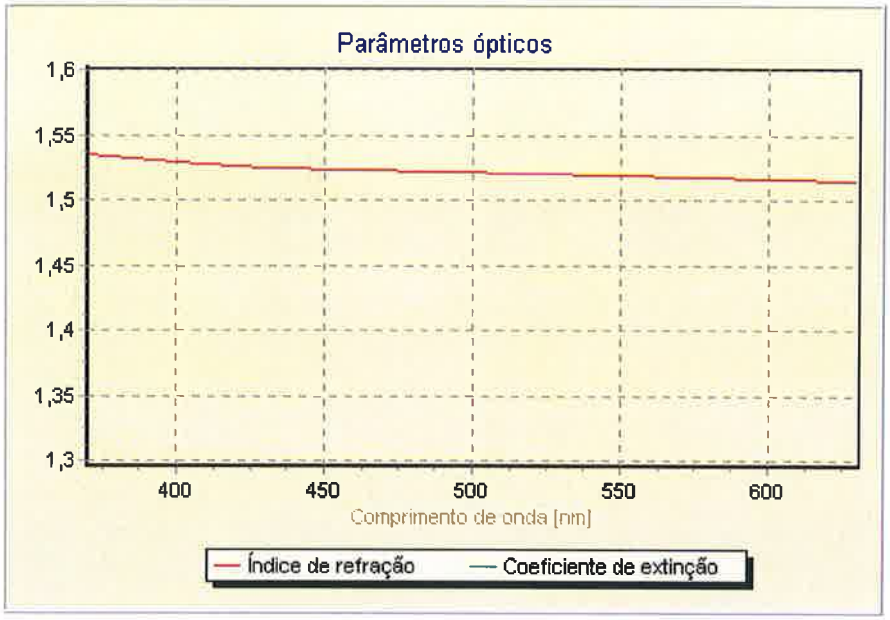


Fig. 104: Índice de refração em função do comprimento de onda para o vidro (substrato).

Além dos procedimentos acima delineados, o iRefrac também permite proceder-se a uma suavização da curva de espectro. Tal procedimento é muito importante pois num espectro real, ao contrário do que foi empregado nos exemplos mostrados até agora, há inúmeras fontes de erros, tais como trocas dos sensores, filtros e fontes de luz (como já explicado no início desta secção), variações das condições ópticas do ar na câmara das amostras (pressão, temperatura, umidade), falta de homogeneidade no filme, erros de natureza eletrônica (no equipamento, micro), erros de arredondamento no *software* de controle, etc. Tais erros fazem com que a curva deixe de ser suave, apresentando variações abruptas que não se devem às propriedades ópticas da amostra analisada.

O procedimento de suavização da curva é simplesmente o de tomar-se a média entre o valor da transmitância em um dado ponto e os seus dois vizinhos seguintes e os dois vizinhos anteriores, e atribuir-se ao ponto esse valor médio. Numericamente, isso

equivale a uma convolução com um filtro do tipo "passa-baixas", eliminando componentes de alta freqüência, geralmente associadas a erros impulsivos.

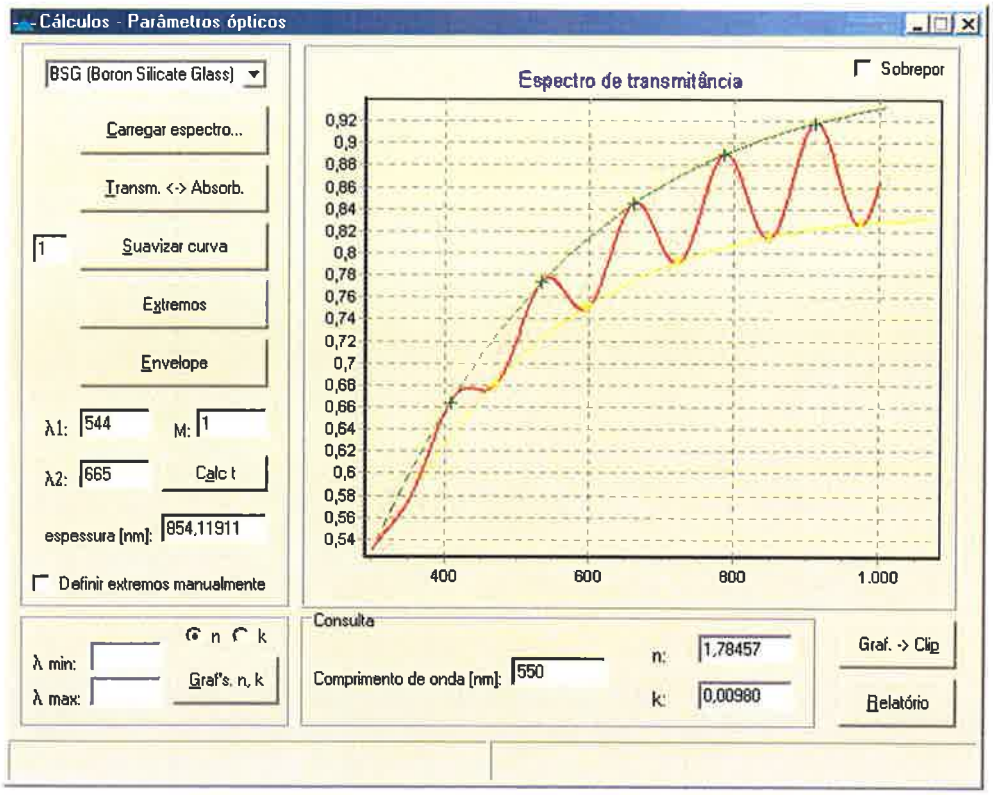


Fig. 105: Janela do programa iRefrac.

A atribuição da média local a um ponto pode ser repetida várias vezes, sendo que quanto maior o número de repetições, mais suave a curva fica. O problema é que um número de excessivo de passagens faz com que se perca informações já que estamos alterando os valores da curva.

As figuras seguintes ilustram tal procedimento, mostrando o aspecto da curva após um certo número de passagens do filtro.

Após a suavização da curva, o iRefrac localiza os pontos de máximo e mínimo através da derivação numérica do espectro. Tais pontos de extremo servirão como valores iniciais para o cálculo do envelope, (ilustrado na figura 111). Assim, a partir dos pontos extremos, geram-se polinômios interpoladores para as curvas de máximo e mínimo.

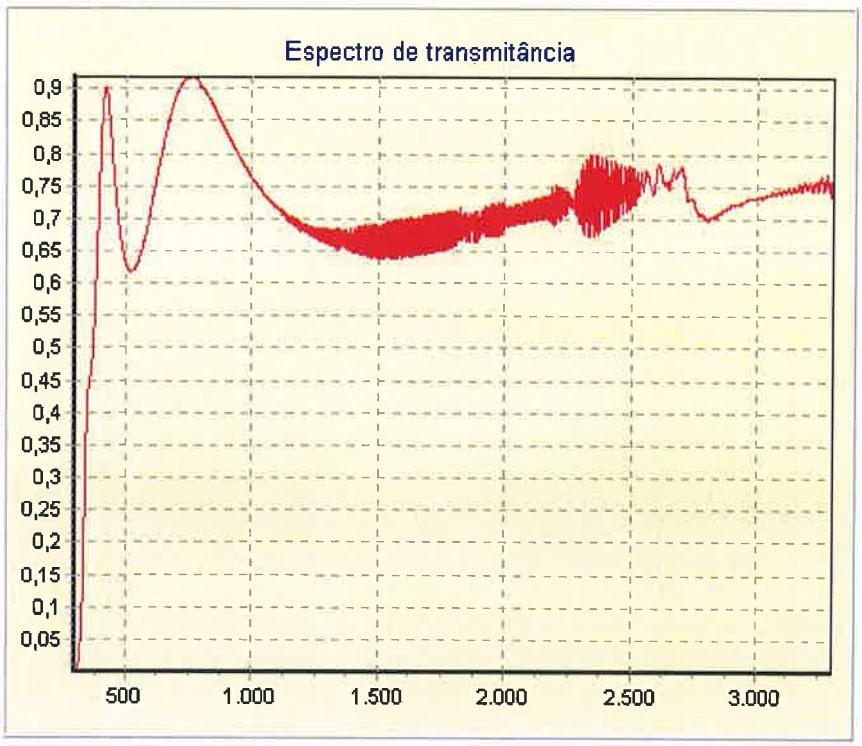


Fig. 106: Espectro original, amostra VB04_90.

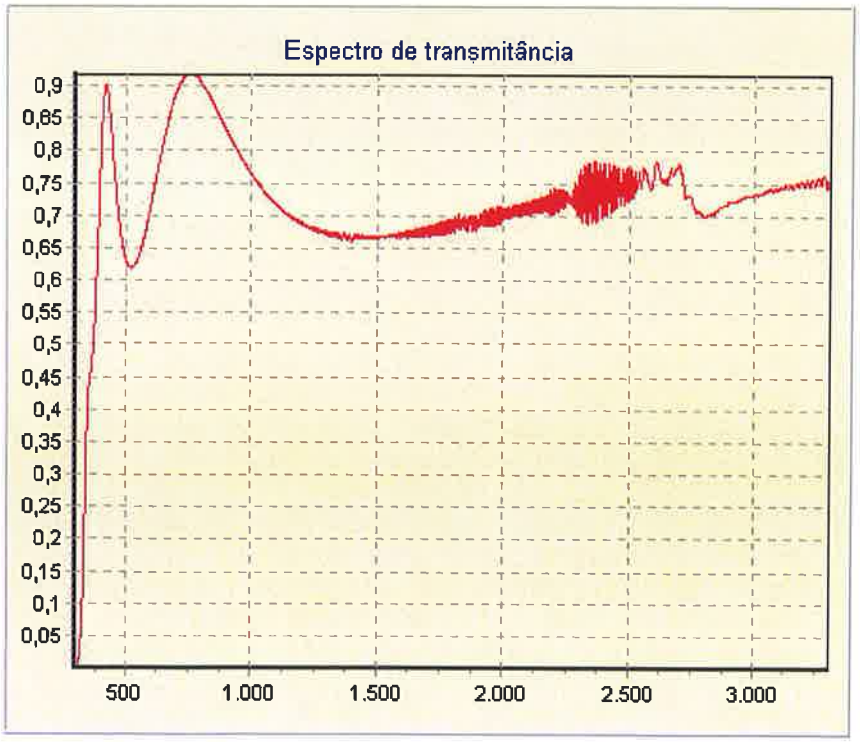


Fig. 107: Espectro após 1 passagem do filtro.

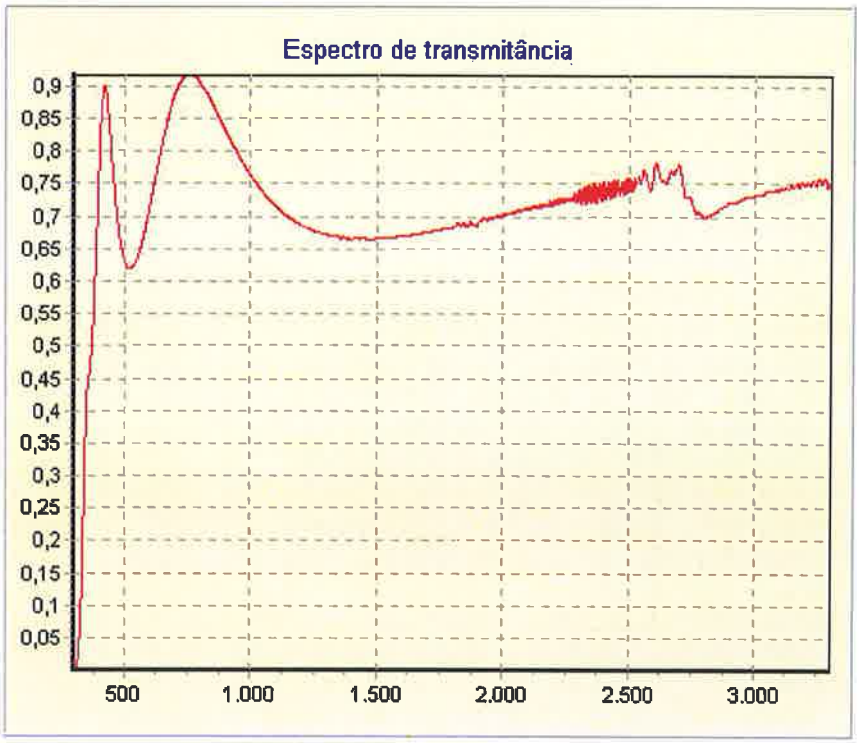


Fig. 108: Espectro após 5 passagens do filtro.

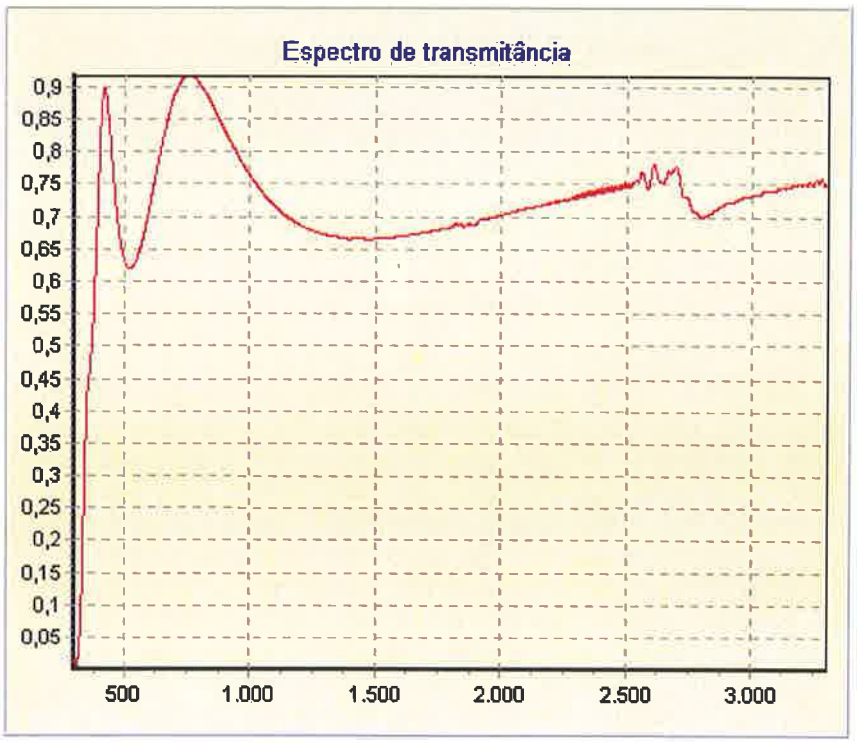


Fig. 109: Espectro após 10 passagens do filtro.

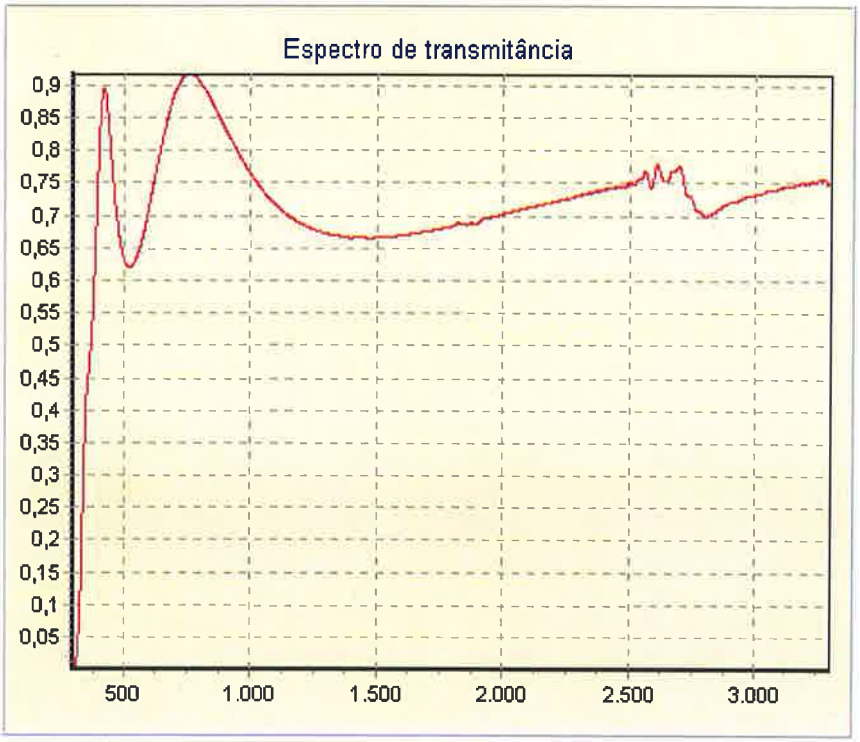


Fig. 110: Espectro após 15 passagens do filtro.

No próximo passo, verifica-se se o candidato a envelope cruza a curva em algum ponto. Se houver cruzamento, pega-se dois desses pontos de cruzamento contíguos e toma-se o ponto intermediário como nova estimativa para gerar-se novos polinômios. Daí repete-se o procedimento até a convergência ou até um número máximo de interações. Então, o envelope em si nada mais é do que um polinômio interpolador na forma de Legendre para a curva de pontos de máximos e outro para a curva formada pelos pontos de mínimos.

Após a determinação do envelope, os parâmetros podem ser extraídos / calculados com base nas equações já apresentadas.

A primeira coisa que reparamos nos espectros reais mostrados nas figuras 106 a 110 é que eles não são muito parecidos com o espectro hipotético apresentado na figura 100. Isso se deve ao fato de que o número de picos é diretamente proporcional à espessura do filme. Assim, para filmes mais finos como os que estão sendo analisados no presente trabalho, existem poucos picos. Tal característica dificulta a extração de parâmetros das curvas, e em alguns casos até a inviabiliza, como para as amostras mais

finas (600 Å) que não apresentam nenhum pico dentro do range de análise (~300 a 3300 nm).

Outro problema é que, mesmo após a etapa de suavização, as curvas continuam apresentando variações espúrias mas que não podem ser eliminadas por um maior número de passagens do filtro pois o processo começaria a comprometer os valores das alturas dos picos reais.

Assim, o procedimento automático do *software* de localização dos picos de máximos e mínimos e depois o de cálculo do envelope fica comprometido e precisamos fazer a localização manual dos pontos que gerarão o envelope da curva (mesmo com a localização manual dos pontos, o procedimento para o cálculo do envelope continua sendo automático para tornar os resultados o mais independentes possível de escolhas subjetivas pessoais).

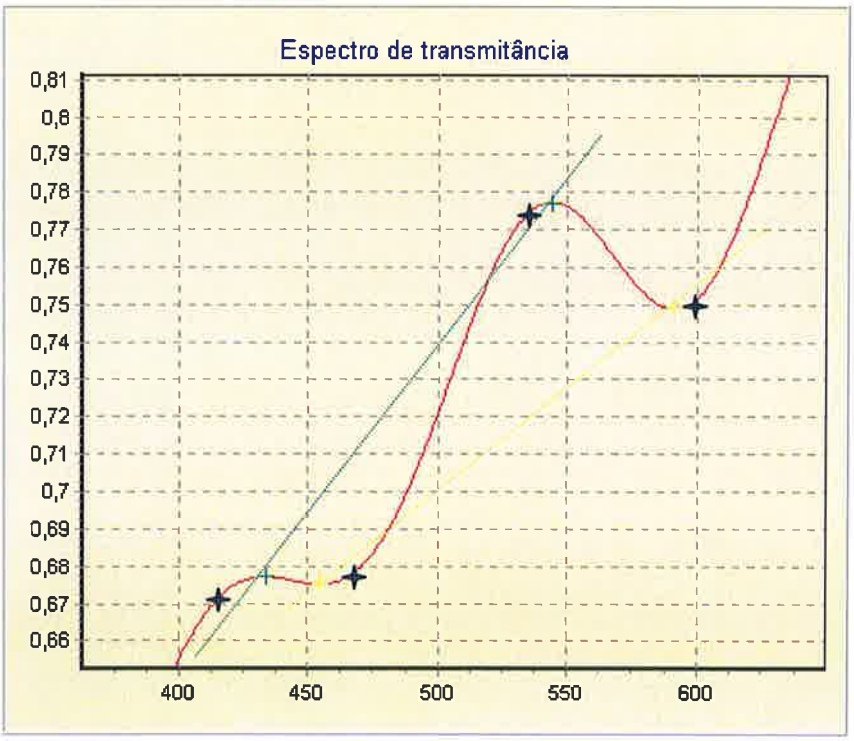


Fig. 111: Determinação do envelope mostrando os pontos extremos como valores inicias. Em azul, próximo refinamento.

Finalmente, como estamos interessados em caracterizar o comportamento birrefringente das amostras, precisamos tomar a medida do índice de refração de cada uma utilizando primeiramente o polarizador na posição *p* e de novo depois com o

polarizador na posição *s*. Uma outra estimativa possível seria a de tomar as duas medidas sem o polarizador mas girando a amostra de 90° entre uma medida e outra.

Cabe aqui um comentário: o polarizador, que nada mais é do que uma grade condutora, só filtra adequadamente a polarização da luz cujo comprimento de onda seja suficientemente maior do que o espaçamento entre as linhas da grade. Assim, é possível que para os comprimentos de onda menores, próximos ao ultravioleta, não haja uma polarização significativa da luz, o que pode introduzir erros em nossas medidas (veja por exemplo Bomzon et al. (2001)). Por outro lado, na região do ultravioleta, o próprio vidro dos polarizadores não é transparente, logo, impossibilitando medidas nessa região.

ANEXO II – Tabelas de índice de refração de todos os filmes de TiO_x fabricados

A tabela 32 mostra os valores de espessura e partes real e imaginária do índice de refração para os comprimentos de onda 458 (azul), 550 (verde) e 633 nm (vermelho). E a tabela 33 apresenta os valores das diferenças de índice de refração para esses comprimentos de onda.

A simbologia empregada para a leitura das tabelas 32 e 33 é a seguinte:

— → Medida tomada com a amostra em posição normal e s/ polarizador
90° → Medida tomada s/ polarizador mas com a amostra girada de 90°
p → Medida tomada com polarizador em posição *p*
90° → Mesmo que o anterior mas com a amostra girada de 90°
s → Medida tomada com polarizador em posição *s*
90° → Mesmo que o anterior mas com a amostra girada de 90°

Tab. 31: Resultados das análises dos filmes de TiO_2.

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
—		190,46	2,45257	0,01531	2,47271	0,01172	2,48538	0,00746
90°	VA01	—	—	—	—	—	—	—
p		182,57	2,47078	0,01876	2,47623	0,01620	2,47818	0,01294
90°	01	—	—	—	—	—	—	—
s		187,33	2,43731	0,01565	2,44847	0,01331	2,45468	0,01035
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		184,76	2,43897	0,00597	2,43501	0,00538	2,43046	0,00457
90°	VA04	—	—	—	—	—	—	—
P		180,23	2,46529	0,01137	2,45403	0,01230	2,44350	0,01296
90°	04	—	—	—	—	—	—	—
s		180,18	2,45668	0,01126	2,44453	0,01213	2,43321	0,01274
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		182,79	2,45560	0,00725	2,45361	0,00655	2,45034	0,00557
90°	VA07	—	—	—	—	—	—	—
p		174,82	2,49523	0,01425	2,47393	0,01547	2,45561	0,01637
90°	07	—	—	—	—	—	—	—
s		179,03	2,47069	0,01248	2,45742	0,01322	2,44504	0,01363
90°		—	—	—	—	—	—	—

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
—		184,39	2,43920	0,00909	2,43537	0,00909	2,43081	0,00883
90°	VA10	—	—	—	—	—	—	—
p		180,95	2,46216	0,01159	2,45061	0,01241	2,43989	0,01295
90°	10	—	—	—	—	—	—	—
s		178,60	2,45524	0,01336	2,43411	0,01469	2,41607	0,01576
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		185,77	2,45152	0,01421	2,46224	0,01122	2,46805	0,00759
out		179,57	2,48610	0,01917	2,48768	0,01757	2,48650	0,01530
90°	VB01	184,98	2,46046	0,01683	2,47172	0,01411	2,47802	0,01068
out		182,97	2,46810	0,01631	2,47553	0,01389	2,47898	0,01079
p	01	186,32	2,45659	0,01522	2,47001	0,01261	2,47763	0,00935
90°		—	—	—	—	—	—	—
s		185,84	2,43678	0,01613	2,44479	0,01377	2,44877	0,01072
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		183,06	2,44990	0,00864	2,44183	0,00881	2,43391	0,00873
out		179,26	2,47246	0,01354	2,45703	0,01500	2,44316	0,01619
90°	VB04	181,42	2,45761	0,01070	2,44689	0,01137	2,43694	0,01178
out		181,42	2,45761	0,01070	2,44689	0,01137	2,43694	0,01178
p	04	184,70	2,45123	0,00942	2,44836	0,00986	2,44418	0,01006
90°		—	—	—	—	—	—	—
s		178,69	2,45458	0,01235	2,43105	0,01371	2,41122	0,01484
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		179,50	2,47109	0,00808	2,46028	0,00828	2,44996	0,00825
out		176,19	2,49872	0,01442	2,48128	0,01575	2,46566	0,01679
90°	VB07	176,13	2,49871	0,01440	2,48204	0,01569	2,46703	0,01668
out		176,13	2,49871	0,01440	2,48204	0,01569	2,46703	0,01668
p	07	176,21	2,49686	0,01399	2,47988	0,01529	2,46479	0,01625
90°		—	—	—	—	—	—	—
s		176,32	2,47934	0,01449	2,45781	0,01604	2,43910	0,01730
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		180,22	2,46500	0,00695	2,45526	0,00706	2,44590	0,00697
out		1746,65	2,49751	0,01370	2,47770	0,01534	2,46025	0,01674
90°	VB10	176,41	2,49324	0,01280	2,47711	0,01393	2,46268	0,01481
out		176,41	2,49324	0,01280	2,47711	0,01393	2,46268	0,01481
p	10	178,65	2,48008	0,01035	2,46793	0,01124	2,45639	0,01190
90°		—	—	—	—	—	—	—
s		175,65	2,47469	0,01110	2,45102	0,01228	2,43067	0,01326
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		185,19	2,45987	0,01669	2,47049	0,01405	2,47636	0,01071
90°	VC01	183,34	2,46109	0,01590	2,46856	0,01371	2,47223	0,01086
p		186,11	2,43756	0,01616	2,44644	0,01383	2,45113	0,01082
90°	01	185,12	2,43935	0,01585	2,44620	0,01381	2,44940	0,01110
s		185,59	2,45024	0,01765	2,45891	0,01529	2,46335	0,01222
90°		184,06	2,45408	0,01745	2,46079	0,01543	2,46382	0,01271

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
—		181,77	2,46266	0,01062	2,45495	0,01120	2,44713	0,01152
90°	VC04	184,20	2,44590	0,00752	2,44290	0,00727	2,43890	0,00679
p		181,56	2,44747	0,01082	2,43649	0,01183	2,42729	0,01238
90°	04	183,09	2,44321	0,01056	2,43317	0,01131	2,42353	0,01181
s		180,81	2,46386	0,01195	2,45144	0,01298	2,43986	0,01375
90°		181,58	2,45926	0,01180	2,44711	0,01282	2,43579	0,01356
—		183,08	2,45282	0,01043	2,44560	0,01095	2,43826	0,01121
90°	VC07	182,38	2,45989	0,01055	2,45206	0,01109	2,44420	0,01137
p		183,03	2,44034	0,00995	2,43016	0,01057	2,42040	0,01095
90°	07	184,98	2,41904	0,00744	2,41045	0,00765	2,40336	0,00746
s		180,61	2,45860	0,01182	2,44597	0,01282	2,43425	0,01356
90°		181,27	2,46029	0,01181	2,44712	0,01287	2,43500	0,01365
—		183,85	2,45394	0,01038	2,44713	0,01096	2,44011	0,01129
90°	VC10	183,17	2,45386	0,01042	2,44687	0,01097	2,43976	0,01126
p		184,30	2,43290	0,00961	2,42488	0,01023	2,41679	0,01062
90°	10	182,97	2,43929	0,01049	2,42933	0,01129	2,41980	0,01185
s		181,46	2,45556	0,01192	2,44406	0,01299	2,43325	0,01378
90°		181,84	2,45474	0,01178	2,44279	0,01282	2,43170	0,01360
—		101,20	2,45025	0,02021	2,42793	0,02529	2,40847	0,03013
90°	VE01	102,47	2,41901	0,01517	2,39775	0,01895	2,37927	0,02254
p		96,44	2,42244	0,01772	2,39872	0,02224	2,37802	0,02658
90°	01	100,78	2,42932	0,01590	2,40440	0,01986	2,38264	0,02363
s		95,98	2,42262	0,01756	2,39867	0,02179	2,37780	0,02577
90°		95,98	2,41920	0,01899	2,39604	0,02364	2,37585	0,02805
—		121,84	2,41993	0,01065	2,40015	0,01381	2,38292	0,01693
90°	VE04	122,29	2,41270	0,01272	2,39393	0,01648	2,37758	0,02020
p		121,47	2,41515	0,01324	2,39342	0,01707	2,37443	0,02085
90°	04	120,99	2,41611	0,01326	2,39517	0,01702	2,37691	0,02071
s		122,01	2,40505	0,01342	2,38351	0,01725	2,36469	0,02101
90°		122,14	2,39696	0,01351	2,37683	0,01720	2,35929	0,02079
—		119,61	2,42560	0,01134	2,40570	0,01456	2,38839	0,01770
90°	VE07	119,33	2,42427	0,01132	2,40336	0,01477	2,38512	0,01820
p		119,48	2,40534	0,01423	2,38503	0,01830	2,36731	0,02231
90°	07	118,47	2,42097	0,01245	2,39938	0,01618	2,38051	0,01987
s		120,04	2,39652	0,01425	2,37667	0,01823	2,35937	0,02213
90°		119,55	2,40140	0,01320	2,38041	0,01700	2,36208	0,02074
—		122,39	2,41808	0,01078	2,39751	0,01403	2,37957	0,01726
90°	VE10	122,83	2,41416	0,01140	2,39367	0,01494	2,37578	0,01848
p		119,73	2,42280	0,01166	2,39882	0,01518	2,37782	0,01867
90°	10	118,99	2,43397	0,01036	2,40821	0,01347	2,38566	0,01656
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—	VE13	101,01	2,44167	0,02018	2,42136	0,02528	2,40368	0,03016
90°		102,16	2,41711	0,01559	2,39691	0,01930	2,37938	0,02278

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
p	01	101,03	2,42955	0,01825	2,40787	0,02288	2,38898	0,02729
90°		123,52	2,41569	0,01115	2,39551	0,01462	2,37791	0,01808
s		97,50	2,43140	0,01435	2,40634	0,01808	2,38446	0,02166
90°		98,32	2,42573	0,01602	2,40381	0,02001	2,38474	0,02379
—		121,67	2,41495	0,01534	2,39551	0,01987	2,37853	0,02436
90°	VE16	120,96	2,41782	0,01555	2,39837	0,02009	2,38139	0,02459
p		122,69	2,40035	0,01330	2,38052	0,01722	2,36322	0,02109
90°	04	121,67	2,40385	0,01351	2,38326	0,01753	2,36526	0,02153
s		120,66	2,42314	0,01015	2,39951	0,01348	2,37880	0,01684
90°		120,86	2,41202	0,01235	2,39085	0,01612	2,37234	0,01987
—		120,77	2,39178	0,01509	2,37449	0,01925	2,35948	0,02329
90°	VF01	120,04	2,39813	0,01246	2,37942	0,01614	2,36313	0,01979
p		117,96	2,42280	0,01159	2,40055	0,01516	2,38110	0,01873
90°	01	119,97	2,39578	0,01319	2,37606	0,01707	2,35886	0,02091
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		121,83	2,39678	0,01193	2,37899	0,01539	2,36354	0,01880
90°	VF04	122,31	2,39493	0,01307	2,37734	0,01685	2,36206	0,02058
p		121,42	2,39920	0,01343	2,37996	0,01728	2,36320	0,02106
90°	04	119,93	2,42123	0,01144	2,39951	0,01500	2,38052	0,01856
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		—	—	—	—	—	—	—
90°	VF07	—	—	—	—	—	—	—
p		—	—	—	—	—	—	—
90°	07	—	—	—	—	—	—	—
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		—	—	—	—	—	—	—
90°	VF10	—	—	—	—	—	—	—
p		—	—	—	—	—	—	—
90°	10	—	—	—	—	—	—	—
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		—	—	—	—	—	—	—
90°	VF13	—	—	—	—	—	—	—
p		—	—	—	—	—	—	—
90°	01	—	—	—	—	—	—	—
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—	VF16	—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
p	04	—	—	—	—	—	—	—

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
90°		—	—	—	—	—	—	—
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		101,03	2,04371	0,10622	2,08129	0,11486	2,10781	0,12050
90°	VH01	102,22	2,03541	0,10690	2,07841	0,11473	2,10826	0,11965
p		101,66	2,02649	0,10552	2,06260	0,11440	2,08806	0,12032
90°	01	100,82	2,04244	0,10379	2,07913	0,11180	2,10429	0,11698
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		86,85	2,31917	0,05879	2,30204	0,06881	2,28722	0,07734
90°	VH02	86,95	2,31777	0,06335	2,29642	0,07475	2,27804	0,08460
p		86,75	2,30595	0,05743	2,28586	0,06768	2,26853	0,07652
90°	04	86,91	2,30617	0,05891	2,28758	0,06930	2,27154	0,07823
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		87,84	2,27970	0,07125	2,26267	0,08298	2,24794	0,09285
90°	VH03	88,14	2,27861	0,06732	2,26552	0,07791	2,25411	0,08670
p		88,32	2,26991	0,06525	2,25455	0,07598	2,24126	0,08500
90°	07	87,82	2,27056	0,06536	2,25225	0,07627	2,23641	0,08549
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		86,55	2,33052	0,05511	2,31045	0,06534	2,29320	0,07427
90°	VH04	86,59	2,33126	0,05401	2,31024	0,06406	2,29216	0,07283
p		86,31	2,32247	0,05238	2,29886	0,06241	2,27852	0,07123
90°	10	86,67	2,32349	0,05376	2,30257	0,06388	2,28455	0,07276
s		86,76	2,33146	0,05435	2,31145	0,06441	2,29425	0,07318
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		101,12	2,04241	0,10707	2,08070	0,11575	2,10772	0,12142
90°	VH05	102,28	2,02824	0,10794	2,07038	0,11626	2,09998	0,12158
p		102,63	2,01675	0,10641	2,05631	0,11485	2,08394	0,12034
90°	01	100,21	2,04556	0,10173	2,07577	0,11069	2,09709	0,11674
s		103,22	2,01363	0,10864	2,05843	0,11665	2,08976	0,12165
90°		103,08	2,01504	0,10455	2,05637	0,11260	2,08550	0,11773
—		86,63	2,32884	0,05449	2,31034	0,06413	2,29436	0,07244
90°	VH06	86,70	2,32805	0,05561	2,30996	0,06549	2,29434	0,07401
p		87,27	2,30788	0,05318	2,28732	0,06311	2,26962	0,07178
90°	04	86,19	2,32693	0,05272	2,30495	0,06237	2,28595	0,07077
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		86,21	2,33504	0,05498	2,31371	0,06523	2,29535	0,07419
—	VH07	86,91	2,31727	0,05748	2,30174	0,06686	2,28821	0,07477
90°		86,99	2,31593	0,05732	2,29971	0,06698	2,28566	0,07519
p	07	—	—	—	—	—	—	—
90°		87,69	2,28682	0,05670	2,26692	0,06674	2,24975	0,07538
s		88,31	2,29978	0,00584	2,28504	0,00685	2,27240	0,00771

Amost. / Pos.		Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
90°		87,34	2,30484	0,00587	2,28794	0,00688	2,27333	0,00773
—		86,19	2,33388	0,05346	2,31355	0,06329	2,29602	0,07186
90°	VH08	86,36	2,33829	0,05881	2,31433	0,07032	2,29377	0,08050
p		87,02	2,30940	0,05350	2,28869	0,06312	2,27076	0,07145
90°	10	86,87	2,31347	0,05518	2,29344	0,06502	2,27611	0,07352
s		86,39	2,33253	0,00554	2,31097	0,00658	2,29247	0,00750
90°		86,31	2,32527	0,00571	2,30479	0,00675	2,28716	0,00764
—		100,78	2,04844	0,10535	2,08338	0,11430	2,10813	0,12026
90°	VH09	101,28	2,04059	0,10560	2,07759	0,11409	2,10336	0,11966
p		102,62	2,01409	0,10324	2,05048	0,11152	2,07574	0,11692
90°	01	100,85	2,03839	0,10199	2,07091	0,11041	2,09336	0,11599
s		101,51	2,03852	0,01061	2,07598	0,01147	2,10224	0,01202
90°		99,95	2,05418	0,01050	2,08453	0,01145	2,10609	0,01209
—		87,02	2,32196	0,05689	2,29889	0,06768	2,27910	0,07713
90°	VH10	86,92	2,30841	0,05920	2,29177	0,06926	2,27737	0,07782
p		87,89	2,29456	0,05722	2,27724	0,06737	2,26237	0,07610
90°	04	86,75	2,30814	0,05718	2,28712	0,06780	2,26909	0,07705
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		88,08	2,27335	0,06881	2,26030	0,07965	2,24892	0,08865
90°	VH11	88,14	2,27228	0,06864	2,25991	0,07931	2,24910	0,08814
p		87,71	2,27107	0,06620	2,25406	0,07707	2,23933	0,08621
90°	07	89,36	2,24716	0,06537	2,23604	0,07550	2,22632	0,08387
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		87,28	2,31692	0,06079	2,29543	0,07187	2,27691	0,08148
90°	VH12	87,15	2,31346	0,05939	2,29504	0,06981	2,27915	0,07877
p		88,32	2,28473	0,05605	2,26900	0,06564	2,25542	0,07382
90°	10	87,66	2,29863	0,05783	2,28146	0,06795	2,26667	0,07663
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		110,26	2,03148	0,06854	2,02983	0,07936	2,02898	0,08824
90°	VI01	110,22	2,02604	0,06940	2,01767	0,08160	2,01230	0,09175
p		110,08	2,03981	0,06697	2,04048	0,07687	2,04087	0,08492
90°	01	109,67	2,04405	0,06701	2,04348	0,07697	2,04281	0,08507
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		108,78	2,03990	0,00715	2,03670	0,00820	2,03361	0,00905
—		108,07	2,14972	0,05157	2,13305	0,06156	2,11899	0,07035
90°	VI02	108,59	2,14933	0,05176	2,13640	0,06136	2,12550	0,06974
p		—	—	—	—	—	—	—
90°	04	109,25	2,14431	0,05097	2,13105	0,06062	2,11992	0,06908
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
—		108,17	2,07604	0,06573	2,07516	0,07568	2,07430	0,08383
90°	VI03	108,29	2,07393	0,06651	2,07295	0,07671	2,07208	0,08510
p		107,97	2,07567	0,06598	2,07403	0,07609	2,07255	0,08442
90°	07	108,34	2,07508	0,06538	2,07380	0,07559	2,07275	0,08404
s		—	—	—	—	—	—	—
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		109,84	2,14971	0,04873	2,13434	0,05848	2,12150	0,06714
90°	VI04	109,75	2,15096	0,05265	2,13440	0,06303	2,12046	0,07223
p		109,71	2,14178	0,04957	2,12976	0,05891	2,11970	0,06710
90°	10	110,32	2,14059	0,04918	2,13053	0,05826	2,12212	0,06618
s		109,18	2,15227	0,00502	2,13731	0,00599	2,12474	0,00685
90°		108,71	2,15293	0,00501	2,13710	0,00598	2,12377	0,00683
—		110,71	2,02811	0,07094	2,03260	0,08129	2,03627	0,08966
90°	VI05	110,48	2,00755	0,07276	2,01499	0,08281	2,02092	0,09079
p		110,69	2,03271	0,06911	2,03730	0,07917	2,04101	0,08730
90°	01	110,00	2,02929	0,07154	2,03359	0,08174	2,03694	0,08993
s		109,78	2,03662	0,00729	2,04112	0,00834	2,04468	0,00917
90°		110,44	2,01457	0,00718	2,01997	0,00819	2,02427	0,00900
—		109,23	2,14176	0,05192	2,12932	0,06168	2,11895	0,07021
90°	VI06	108,95	2,14100	0,05227	2,13019	0,06177	2,12115	0,07001
p		109,19	2,14074	0,05111	2,12840	0,06067	2,11806	0,06903
90°	04	108,69	2,13832	0,05156	2,12490	0,06135	2,11368	0,06992
s		109,00	2,14138	0,00523	2,12841	0,00619	2,11751	0,00702
90°		108,58	2,15378	0,00512	2,13897	0,00610	2,12652	0,00695
—		107,66	2,08037	0,06712	2,07860	0,07739	2,07701	0,08583
90°	VI07	107,63	2,08196	0,06727	2,07603	0,07790	2,07095	0,08672
p		107,26	2,08551	0,06606	2,08356	0,07611	2,08175	0,08436
90°	07	107,24	2,08620	0,06598	2,08394	0,07615	2,08194	0,08453
s		106,78	2,08879	0,00674	2,08619	0,00777	2,08385	0,00862
90°		106,98	2,08789	0,00671	2,08346	0,00776	2,07968	0,00863
—		108,46	2,14388	0,05190	2,12979	0,06170	2,11798	0,07029
90°	VI08	108,60	2,14095	0,05296	2,12819	0,06289	2,11756	0,07158
p		108,83	2,13912	0,05174	2,12639	0,06138	2,11571	0,06981
90°	10	108,26	2,14148	0,05241	2,12917	0,06198	2,11877	0,07030
s		109,01	2,14675	0,00508	2,13312	0,00604	2,12170	0,00688
90°		107,72	2,15313	0,00537	2,14059	0,00635	2,13002	0,00719
—		110,70	2,03798	0,06543	2,04054	0,07505	2,04255	0,08287
90°	VI09	110,91	2,03012	0,06678	2,03111	0,07699	2,03199	0,08537
p		111,15	2,02534	0,06602	2,02779	0,07559	2,02967	0,08331
90°	01	109,44	2,04835	0,06424	2,04258	0,07412	2,03755	0,08225
s		109,69	2,04146	0,00678	2,04255	0,00778	2,04330	0,00860
90°		110,30	2,03996	0,00643	2,03777	0,00741	2,03583	0,00822
—	VI10	108,87	2,13588	0,05238	2,12306	0,06227	2,11242	0,07091
90°		109,09	2,13721	0,05269	2,12075	0,06295	2,10699	0,07199

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
p	04	108,77	2,13777	0,05245	2,12684	0,06174	2,11761	0,06973
90°		109,00	2,13340	0,05239	2,12370	0,06160	2,11553	0,06952
s		107,58	2,15242	0,00540	2,13788	0,00642	2,12564	0,00730
90°		—	—	—	—	—	—	—
—		107,83	2,06237	0,07069	2,06288	0,08137	2,06329	0,09010
90°	VI11	107,80	2,05824	0,07098	2,06069	0,08141	2,06260	0,08986
p		106,81	2,07340	0,07084	2,07263	0,08135	2,07179	0,08991
90°	07	107,36	2,06716	0,07060	2,06779	0,08101	2,06813	0,08946
s		104,43	2,08582	0,00722	2,07752	0,00831	2,07021	0,00920
90°		106,93	2,07630	0,00702	2,07617	0,00807	2,07594	0,00892
—		109,60	2,14540	0,04906	2,13463	0,05798	2,12554	0,06572
90°	VI12	109,38	2,14353	0,04948	2,13061	0,05889	2,11975	0,06716
p		109,86	2,13650	0,04797	2,12478	0,05668	2,11484	0,06425
90°	10	109,02	2,14925	0,04958	2,13720	0,05865	2,12701	0,06653
s		109,83	2,13896	0,00479	2,12740	0,00566	2,11761	0,00642
90°		108,96	2,14793	0,00501	2,13880	0,00586	2,13101	0,00659
—		116,16	2,38766	0,01407	2,36756	0,01808	2,35004	0,02201
90°	VJ01	119,01	2,39000	0,01327	2,37047	0,01709	2,35345	0,02085
p		117,97	2,37840	0,01315	2,35849	0,01690	2,34113	0,02058
90°	01	118,01	2,37886	0,01341	2,35909	0,01722	2,34185	0,02095
s		117,42	2,38592	0,01390	2,36596	0,01785	2,34856	0,02172
90°		117,46	2,38171	0,00138	2,36266	0,00177	2,34607	0,00216
—		122,76	2,47771	0,04848	2,62035	0,01336	2,55926	0,01706
90°	VJ02	123,80	2,47841	0,04794	2,60180	0,01316	2,54445	0,01667
p		123,25	2,46062	0,04830	2,60156	0,01372	2,54021	0,01741
90°	04	123,97	2,45891	0,04762	2,60156	0,01335	2,54182	0,01692
s		122,70	2,46457	0,04879	2,60674	0,01390	2,54552	0,01769
90°		122,97	2,43710	0,04895	2,60567	0,01389	2,54501	0,01752
—		116,29	2,52861	0,04994	2,64438	0,01484	2,57525	0,01881
90°	VJ03	116,53	2,49854	0,04989	2,64196	0,01468	2,57302	0,01865
p		117,58	2,50298	0,04899	2,61989	0,01468	2,55160	0,01852
90°	07	117,22	2,51295	0,05124	2,63290	0,01664	2,56432	0,02072
s		117,42	2,51284	0,05006	2,63184	0,01532	2,56384	0,01930
90°		117,00	2,51736	0,04984	2,63363	0,01533	2,56534	0,01936
—		114,44	2,39826	0,01371	2,37794	0,01762	2,36022	0,02146
90°	VJ05	116,74	2,39597	0,01320	2,37683	0,01693	2,36018	0,02058
p		115,10	2,39893	0,01343	2,37744	0,01729	2,35867	0,02109
90°	01	115,60	2,39466	0,01371	2,37369	0,01768	2,35539	0,02159
s		116,04	2,39036	0,01358	2,37064	0,01754	2,35345	0,02143
90°		116,15	2,39237	0,01365	2,37211	0,01762	2,35443	0,02153
—	VJ06	121,40	2,48959	0,04933	2,63107	0,01343	2,56776	0,01718
90°		123,13	2,48720	0,04897	2,60896	0,01376	2,54953	0,01755
p	04	121,33	2,48334	0,04923	2,61933	0,01385	2,55641	0,01760
90°		121,21	2,48055	0,04957	2,61981	0,01417	2,55629	0,01799

Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
s	122,27	2,47400	0,04910	2,61506	0,01377	2,55274	0,01754
90°	122,77	2,47876	0,04900	2,60066	0,01383	2,54116	0,01758
—	114,80	2,55728	0,05186	2,67089	0,01535	2,59777	0,01945
90°	115,26	2,55280	0,05167	2,66897	0,01513	2,59669	0,01916
VJ07 p	115,49	2,54345	0,05220	2,65948	0,01636	2,58680	0,02053
90°	115,71	2,54092	0,05192	2,65773	0,01612	2,58567	0,02027
07 s	116,17	2,53879	0,05140	2,65359	0,01561	2,58203	0,01966
90°	116,36	2,53796	0,05132	2,65449	0,01553	2,58324	0,01959
—	118,62	2,39214	0,01278	2,37380	0,01644	2,35785	0,02002
90°	119,32	2,39374	0,01261	2,37508	0,01626	2,35885	0,01986
VJ09 p	117,20	2,39611	0,01362	2,37614	0,01742	2,35875	0,02113
90°	117,78	2,39216	0,01342	2,37258	0,01719	2,35553	0,02089
01 s	115,65	2,41082	0,01055	2,38717	0,01362	2,36650	0,01664
90°	—	—	—	—	—	—	—
—	124,36	2,47607	0,04776	2,62270	0,01303	2,56253	0,01679
90°	125,72	2,47420	0,04687	2,61904	0,01299	2,56017	0,01664
VJ10 p	125,90	2,46116	0,04730	2,60725	0,01364	2,54849	0,01738
90°	126,50	2,45952	0,04701	2,60474	0,01362	2,54609	0,01732
04 s	126,52	2,45957	0,04693	2,60672	0,01331	2,54866	0,01703
90°	125,72	2,46080	0,04749	2,60712	0,01341	2,54782	0,01715
—	120,57	2,51249	0,05221	2,65556	0,01466	2,58878	0,01848
90°	120,42	2,51399	0,05266	2,65687	0,01506	2,58940	0,01894
VJ11 p	—	—	—	—	—	—	—
90°	—	—	—	—	—	—	—
10 s	—	—	—	—	—	—	—
90°	121,21	2,49311	0,05195	2,63835	0,01492	2,57297	0,01879
—	106,91	2,42846	0,01562	2,40655	0,01991	2,38743	0,02410
90°	107,65	2,42514	0,01519	2,40399	0,01936	2,38555	0,02341
VL01 p	108,03	2,40352	0,01397	2,38201	0,01782	2,36326	0,02157
90°	108,47	2,40345	0,01403	2,38183	0,01792	2,36296	0,02171
01 s	107,75	2,41297	0,00143	2,39143	0,00184	2,37262	0,00224
90°	108,04	2,41077	0,00143	2,39004	0,00183	2,37197	0,00223
—	127,31	2,38450	0,01420	2,36801	0,01842	2,35368	0,02261
90°	126,11	2,39138	0,01405	2,37387	0,01823	2,35864	0,02237
VL02 p	122,60	2,40792	0,01076	2,38561	0,01408	2,36609	0,01740
90°	123,06	2,39889	0,01177	2,37795	0,01540	2,35965	0,01902
04 s	123,32	2,40686	0,00117	2,38665	0,00155	2,36899	0,00192
90°	123,24	2,40929	0,00118	2,38897	0,00155	2,37121	0,00192
—	118,77	2,40893	0,01629	2,39007	0,02080	2,37365	0,02520
90°	118,92	2,41202	0,01846	2,39405	0,02347	2,37843	0,02834
VL03 p	117,60	2,40268	0,01507	2,38138	0,01916	2,36280	0,02313
90°	114,63	2,43065	0,01262	2,40305	0,01629	2,37884	0,01991
07 s	—	—	—	—	—	—	—
90°	116,86	2,41626	0,00152	2,39500	0,00194	2,37642	0,00236

	Amost. / Pos.	Esp. [nm]	*n* (458)	*k* (458)	*n* (550)	*k* (550)	*n* (633)	*k* (633)
—		106,93	2,43167	0,01798	2,41366	0,02285	2,39801	0,02757
90°	VL05	106,32	2,43759	0,01856	2,41922	0,02355	2,40326	0,02839
p		106,70	2,40830	0,01405	2,38701	0,01794	2,36845	0,02174
90°	01	—	—	—	—	—	—	—
s		105,89	2,41738	0,00143	2,39717	0,00184	2,37957	0,00223
90°		105,44	2,41977	0,00138	2,39765	0,00177	2,37832	0,00216
—		125,48	2,38166	0,01479	2,36587	0,01917	2,35218	0,02350
90°	VL06	125,09	2,38336	0,01473	2,36758	0,01910	2,35390	0,02342
p		—	—	—	—	—	—	—
90°	04	—	—	—	—	—	—	—
s		122,20	2,40662	0,00119	2,38733	0,00155	2,37051	0,00192
90°		121,68	2,40931	0,00118	2,38962	0,00155	2,37245	0,00191
—		120,70	2,39770	0,01734	2,38263	0,02198	2,36962	0,02648
90°	VL07	119,36	2,39646	0,01424	2,37894	0,01810	2,36375	0,02184
p		—	—	—	—	—	—	—
90°	07	—	—	—	—	—	—	—
s		118,58	2,40513	0,00141	2,38621	0,00180	2,36975	0,00218
90°		118,07	2,40653	0,00144	2,38697	0,00185	2,36994	0,00224

Tab. 32: Valores de diferença de índice de refração. Em destaque os maiores valores.

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
—			2,45257	—	2,47271	—	2,48538	—
90°			—		—		—	
p	VA01		2,47078	—	2,47623	—	2,47818	—
90°		180	—		—		—	
s	01		2,43731	—	2,44847	—	2,45468	—
90°			—		—		—	
p-s				**0,03347**		**0,02776**		**0,02350**
90°				—		—		—
—			2,43897	—	2,43501	—	2,43046	—
90°			—		—		—	
p	VA04		2,46529	—	2,45403	—	2,44350	—
90°		180	—		—		—	
s	04		2,45668	—	2,44453	—	2,43321	—
90°			—		—		—	
				0,00861		0,00950		0,01029
90°				—		—		—
—	VA07	180	2,45560	—	2,45361	—	2,45034	—
90°			—		—		—	

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
p 90°	07		2,49523 —	—	2,47393 —	—	2,45561 —	—
s 90°			2,47069 —	—	2,45742 —	—	2,44504 —	—
p-s 90°				**0,02454** —		0,01651 —		0,01057 —
— 90°			2,43920 —	—	2,43537 —	—	2,43081 —	—
p 90°	VA10		2,46216 —	—	2,45061 —	—	2,43989 —	—
s 90°	10	180	2,45524 —	—	2,43411 —	—	2,41607 —	—
p-s 90°				0,00692 —		0,01650 —		**0,02382** —
— out 90°			2,45152 2,48610	-0,00894	2,46224 2,48768	-0,00948	2,46805 2,48650	-0,00997
out p 90°	VB01		2,46046 2,46810	0,01800	2,47172 2,47553	0,01215	2,47802 2,47898	0,00752
s 90°	01	180	2,45659 —	—	2,47001 —	—	2,47763 —	—
p-s 90°			2,43678 —	—	2,44479 —	—	2,44877 —	—
				0,01981 —		**0,02522** —		**0,02886** —
— out 90°			2,44990 2,47246	-0,00771	2,44183 2,45703	-0,00506	2,43391 2,44316	-0,00303
out p 90°	VB04	180	2,45761 2,45761	0,01485	2,44689 2,44689	0,01014	2,43694 2,43694	0,00622
s 90°	04		2,45123 —	—	2,44836 —	—	2,44418 —	—
p-s 90°			2,45458 —	—	2,43105 —	—	2,41122 —	—
				-0,00335 —		0,01731 —		**0,03296** —
— out 90°			2,47109 2,49872	-0,02760	2,46028 2,48128	-0,02100	2,44996 2,46566	-0,01570
out p 90°	VB07		2,49871 2,49871	0,00000	2,48204 2,48204	0,00000	2,46703 2,46703	0,00000
s 90°	07	180	2,49686 —	—	2,47988 —	—	2,46479 —	—
p-s 90°			2,47934 —	—	2,45781 —	—	2,43910 —	—
				0,01752 —		**0,02207** —		**0,02569** —

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
—	VB10 10	180	2,46500	-0,03250	2,45526	-0,02240	2,44590	-0,01430
out			2,49751		2,47770		2,46025	
90°			2,49324	0,00000	2,47711	0,00000	2,46268	0,00000
out			2,49324		2,47711		2,46268	
p			2,48008	—	2,46793	—	2,45639	—
90°			—		—		—	
s			2,47469	—	2,45102	—	2,43067	—
90°			—		—		—	
p-s				0,00539		0,01691		**0,02572**
90°				—		—		—
—	VC01 01	180	2,45987	-0,00122	2,47049	0,00193	2,47636	0,00413
90°			2,46109		2,46856		2,47223	
p			2,43756	-0,00179	2,44644	0,00024	2,45113	0,00173
90°			2,43935		2,44620		2,44940	
s			2,45024	-0,00384	2,45891	-0,00188	2,46335	-0,00047
90°			2,45408		2,46079		2,46382	
p-s				-0,01268		-0,01247		-0,01222
90°				-0,01473		-0,01459		-0,01442
—	VC04 04	180	2,46266	0,01676	2,45495	0,01205	2,44713	0,00823
90°			2,44590		2,44290		2,43890	
p			2,44747	0,00426	2,43649	0,00332	2,42729	0,00376
90°			2,44321		2,43317		2,42353	
s			2,46386	0,00460	2,45144	0,00433	2,43986	0,00407
90°			2,45926		2,44711		2,43579	
p-s				-0,01639		-0,01495		-0,01257
90°				-0,01605		-0,01394		-0,01226
—	VC07 07	180	2,45282	-0,00707	2,44560	-0,00646	2,43826	-0,00594
90°			2,45989		2,45206		2,44420	
p			2,44034	**0,02130**	2,43016	0,01971	2,42040	0,01704
90°			2,41904		2,41045		2,40336	
s			2,45860	-0,00169	2,44597	-0,00115	2,43425	-0,00075
90°			2,46029		2,44712		2,43500	
p-s				-0,01826		-0,01581		-0,01385
90°				**-0,04125**		**-0,03667**		**-0,03164**
—	VC10 10	180	2,45394	0,00008	2,44713	0,00026	2,44011	0,00035
90°			2,45386		2,44687		2,43976	
p			2,43290	-0,00639	2,42488	-0,00445	2,41679	-0,00301
90°			2,43929		2,42933		2,41980	
s			2,45556	0,00082	2,44406	0,00127	2,43325	0,00155
90°			2,45474		2,44279		2,43170	
p-s				**-0,02266**		-0,01918		-0,01646
90°				-0,01545		-0,01346		-0,01190
—	VE01	120	2,45025	**0,03124**	2,42793	**0,03018**	2,40847	**0,02920**

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
90°	01		2,41901		2,39775		2,37927	
p			2,42244	-0,00688	2,39872	-0,00568	2,37802	-0,00462
90°			2,42932		2,40440		2,38264	
s			2,42262	0,00342	2,39867	0,00263	2,37780	0,00195
90°			2,41920		2,39604		2,37585	
p-s				-0,00018		0,00005		0,00022
90°				0,01012		0,00836		0,00679
—	VE04	120	2,41993	0,00723	2,40015	0,00622	2,38292	0,00534
90°			2,41270		2,39393		2,37758	
p			2,41515	-0,00096	2,39342	-0,00175	2,37443	-0,00248
90°			2,41611		2,39517		2,37691	
s	04		2,40505	0,00809	2,38351	0,00668	2,36469	0,00540
90°			2,39696		2,37683		2,35929	
p-s				0,01010		0,00991		0,00974
90°				0,01915		0,01834		0,01762
—	VE07	120	2,42560	0,00133	2,40570	0,00234	2,38839	0,00327
90°			2,42427		2,40336		2,38512	
p			2,40534	-0,01563	2,38503	-0,01435	2,36731	-0,01320
90°			2,42097		2,39938		2,38051	
s	07		2,39652	-0,00488	2,37667	-0,00374	2,35937	-0,00271
90°			2,40140		2,38041		2,36208	
p-s				0,00882		0,00836		0,00794
90°				0,01957		0,01897		0,01843
—	VE10	120	2,41808	0,00392	2,39751	0,00384	2,37957	0,00379
90°			2,41416		2,39367		2,37578	
p			2,42280	-0,01117	2,39882	-0,00939	2,37782	-0,00784
90°	10		2,43397		2,40821		2,38566	
s			—	—	—	—	—	—
90°			—		—		—	
p-s				—		—		—
90°				—		—		—
—	VE13	120	2,44167	**0,02456**	2,42136	**0,02445**	2,40368	**0,02430**
90°			2,41711		2,39691		2,37938	
p			2,42955	0,01386	2,40787	0,01236	2,38898	0,01107
90°			2,41569		2,39551		2,37791	
s	01		2,43140	0,00567	2,40634	0,00253	2,38446	-0,00028
90°			2,42573		2,40381		2,38474	
p-s				-0,00185		0,00153		0,00452
90°				-0,01004		-0,00830		-0,00683
—	VE16	120	2,41495	-0,00287	2,39551	-0,00286	2,37853	-0,00286
90°			2,41782		2,39837		2,38139	
p	04		2,40035	-0,00350	2,38052	-0,00274	2,36322	-0,00204
90°			2,40385		2,38326		2,36526	

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
s 90°			2,42314 2,41202	0,01112	2,39951 2,39085	0,00866	2,37880 2,37234	0,00646
p-s 90°				**-0,02279** -0,00817		-0,01899 -0,00759		-0,01558 -0,00708
— 90°			2,39178 2,39813	-0,00635	2,37449 2,37942	-0,00493	2,35948 2,36313	-0,00365
p 90°	VF01		2,42280 2,39578	**0,02702**	2,40055 2,37606	**0,02449**	2,38110 2,35886	**0,02224**
s 90°	01	120	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°			2,39678 2,39493	0,00185	2,37899 2,37734	0,00165	2,36354 2,36206	0,00148
p 90°	VF04		2,39920 2,42123	**-0,02203**	2,37996 2,39951	-0,01955	2,36320 2,38052	-0,01732
s 90°	04	120	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°			2,04371 2,03541	0,00830	2,08129 2,07841	0,00288	2,10781 2,10826	-0,00045
p 90°	VH01		2,02649 2,04244	-0,01595	2,06260 2,07913	-0,01653	2,08806 2,10429	-0,01623
s 90°	01	90	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°			2,31917 2,31777	0,00140	2,30204 2,29642	0,00562	2,28722 2,27804	0,00918
p 90°	VH02		2,30595 2,30617	-0,00022	2,28586 2,28758	-0,00172	2,26853 2,27154	-0,00301
s 90°	04	90	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°	VH03	90	2,27970 2,27861	0,00109	2,26267 2,26552	-0,00285	2,24794 2,25411	-0,00617
p 90°	07		2,26991 2,27056	-0,00065	2,25455 2,25225	0,00230	2,24126 2,23641	0,00485
s 90°			— —	—	— —	—	— —	—
p-s				—		—		—

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
90°				—		—		—
— 90°	VH04	90	2,33052 2,33126	-0,00074	2,31045 2,31024	0,00021	2,29320 2,29216	0,00104
p 90°			2,32247 2,32349	-0,00102	2,29886 2,30257	-0,00371	2,27852 2,28455	-0,00603
s 90°	10		2,33146 —	—	2,31145 —	—	2,29425 —	—
p-s 90°				-0,00899 —		-0,01259 —		-0,01573 —
— 90°	VH05	90	2,04241 2,02824	0,01417	2,08070 2,07038	0,01032	2,10772 2,09998	0,00774
p 90°			2,01675 2,04556	**-0,02881**	2,05631 2,07577	-0,01946	2,08394 2,09709	-0,01315
s 90°	01		2,01363 2,01504	-0,00141	2,05843 2,05637	0,00206	2,08976 2,08550	0,00426
p-s 90°				0,00312 **0,03052**		-0,00212 0,01940		-0,00582 0,01159
— 90°	VH06	90	2,32884 2,32805	0,00079	2,31034 2,30996	0,00038	2,29436 2,29434	0,00002
p 90°			2,30788 2,32693	-0,01905	2,28732 2,30495	-0,01763	2,26962 2,28595	-0,01633
s 90°	04		— 2,33504	—	— 2,31371	—	— 2,29535	—
p-s 90°				— -0,00811		— -0,00876		— -0,00940
— 90°	VH07	90	2,31727 2,31593	0,00134	2,30174 2,29971	0,00203	2,28821 2,28566	0,00255
p 90°			— 2,28682	—	— 2,26692	—	— 2,24975	—
s 90°	07		2,29978 2,30484	-0,00506	2,28504 2,28794	-0,00290	2,27240 2,27333	-0,00093
p-s 90°				— -0,01802		— **-0,02102**		— **-0,02358**
— 90°	VH08	90	2,33388 2,33829	-0,00441	2,31355 2,31433	-0,00078	2,29602 2,29377	0,00225
p 90°			2,30940 2,31347	-0,00407	2,28869 2,29344	-0,00475	2,27076 2,27611	-0,00535
s 90°	10		2,33253 2,32527	0,00726	2,31097 2,30479	0,00618	2,29247 2,28716	0,00531
p-s 90°				**-0,02313** -0,01180		**-0,02228** -0,01135		**-0,02171** -0,01105
— 90°	VH09	90	2,04844 2,04059	0,00785	2,08338 2,07759	0,00579	2,10813 2,10336	0,00477

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
p 90°	01		2,01409 2,03839	**-0,02430**	2,05048 2,07091	**-0,02043**	2,07574 2,09336	-0,01762
s 90°			2,03852 2,05418	-0,01566	2,07598 2,08453	-0,00855	2,10224 2,10609	-0,00385
p-s 90°				**-0,02443** -0,01579		**-0,02550** -0,01362		**-0,02650** -0,01273
— 90°			2,32196 2,30841	0,01355	2,29889 2,29177	0,00712	2,27910 2,27737	0,00173
p 90°	VH10		2,29456 2,30814	-0,01358	2,27724 2,28712	-0,00988	2,26237 2,26909	-0,00672
s 90°	04	90	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°			2,27335 2,27228	0,00107	2,26030 2,25991	0,00039	2,24892 2,24910	-0,00018
p 90°	VH11		2,27107 2,24716	**0,02391**	2,25406 2,23604	0,01802	2,23933 2,22632	0,01301
s 90°	07	90	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°			2,31692 2,31346	0,00346	2,29543 2,29504	0,00039	2,27691 2,27915	-0,00224
p 90°	VH12		2,28473 2,29863	-0,01390	2,26900 2,28146	-0,01246	2,25542 2,26667	-0,01125
s 90°	10	90	— —	—	— —	—	— —	—
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°			2,03148 2,02604	0,00544	2,02983 2,01767	0,01216	2,02898 2,01230	0,01668
p 90°	VI01		2,03981 2,04405	-0,00424	2,04048 2,04348	-0,00300	2,04087 2,04281	-0,00194
s 90°	01	150	— 2,03990	—	— 2,03670	—	— 2,03361	—
p-s 90°				— 0,00415		— 0,00678		— 0,00920
— 90°	VI02	150	2,14972 2,14933	0,00039	2,13305 2,13640	-0,00335	2,11899 2,12550	-0,00651
p 90°	04		— 2,14431	—	— 2,13105	—	— 2,11992	—
s			—	—	—	—	—	—

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
90°			—		—		—	
p-s				—		—		—
90°				—		—		—
—			2,07604	0,00211	2,07516	0,00221	2,07430	0,00222
90°			2,07393		2,07295		2,07208	
p	VI03		2,07567	0,00059	2,07403	0,00023	2,07255	-0,00020
90°		150	2,07508		2,07380		2,07275	
s	07		—	—	—	—	—	—
90°			—		—		—	
p-s				—		—		—
90°				—		—		—
—			2,14971	-0,00125	2,13434	-0,00006	2,12150	0,00104
90°			2,15096		2,13440		2,12046	
p	VI04		2,14178	0,00119	2,12976	-0,00077	2,11970	-0,00242
90°		150	2,14059		2,13053		2,12212	
s	10		2,15227	-0,00066	2,13731	0,00021	2,12474	0,00097
90°			2,15293		2,13710		2,12377	
p-s				-0,01049		-0,00755		-0,00504
90°				-0,01234		-0,00657		-0,00165
—			2,02811	**0,02056**	2,03260	0,01761	2,03627	0,01535
90°			2,00755		2,01499		2,02092	
p	VI05		2,03271	0,00342	2,03730	0,00371	2,04101	0,00407
90°		150	2,02929		2,03359		2,03694	
s	01		2,03662	**0,02205**	2,04112	**0,02115**	2,04468	**0,02041**
90°			2,01457		2,01997		2,02427	
p-s				-0,00391		-0,00382		-0,00367
90°				0,01472		0,01362		0,01267
—			2,14176	0,00076	2,12932	-0,00087	2,11895	-0,00220
90°			2,14100		2,13019		2,12115	
p	VI06		2,14074	0,00242	2,12840	0,00350	2,11806	0,00438
90°		150	2,13832		2,12490		2,11368	
s	04		2,14138	-0,01240	2,12841	-0,01056	2,11751	-0,00901
90°			2,15378		2,13897		2,12652	
p-s				-0,00064		-0,00001		0,00055
90°				-0,01546		-0,01407		-0,01284
—			2,08037	-0,00159	2,07860	0,00257	2,07701	0,00606
90°			2,08196		2,07603		2,07095	
p	VI07		2,08551	-0,00069	2,08356	-0,00038	2,08175	-0,00019
90°		150	2,08620		2,08394		2,08194	
s	07		2,08879	0,00090	2,08619	0,00273	2,08385	0,00417
90°			2,08789		2,08346		2,07968	
p-s				-0,00328		-0,00263		-0,00210
90°				-0,00169		0,00048		0,00226

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
—	VI08	150	2,14388	0,00293	2,12979	0,00160	2,11798	0,00042
90°	10		2,14095		2,12819		2,11756	
p			2,13912	-0,00236	2,12639	-0,00278	2,11571	-0,00306
90°			2,14148		2,12917		2,11877	
s			2,14675	-0,00638	2,13312	-0,00747	2,12170	-0,00832
90°			2,15313		2,14059		2,13002	
p-s				-0,00763		-0,00673		-0,00599
90°				-0,01165		-0,01142		-0,01125
—	VI09	150	2,03798	0,00786	2,04054	0,00943	2,04255	0,01056
90°	01		2,03012		2,03111		2,03199	
p			2,02534	-0,02301	2,02779	-0,01479	2,02967	-0,00788
90°			2,04835		2,04258		2,03755	
s			2,04146	0,00150	2,04255	0,00478	2,04330	0,00747
90°			2,03996		2,03777		2,03583	
p-s				-0,01612		-0,01476		-0,01363
90°				0,00839		0,00481		0,00172
—	VI10	150	2,13588	-0,00133	2,12306	0,00231	2,11242	0,00543
90°	04		2,13721		2,12075		2,10699	
p			2,13777	0,00437	2,12684	0,00314	2,11761	0,00208
90°			2,13340		2,12370		2,11553	
s			2,15242	—	2,13788	—	2,12564	—
90°			—		—		—	
p-s				-0,01465		-0,01104		-0,00803
90°				—	—	—	—	—
—	VI11	150	2,06237	0,00413	2,06288	0,00219	2,06329	0,00069
90°	07		2,05824		2,06069		2,06260	
p			2,07340	0,00624	2,07263	0,00484	2,07179	0,00366
90°			2,06716		2,06779		2,06813	
s			2,08582	0,00952	2,07752	0,00135	2,07021	-0,00573
90°			2,07630		2,07617		2,07594	
p-s				-0,01242		-0,00489		0,00158
90°				-0,00914		-0,00838		-0,00781
—	VI12	150	2,14540	0,00187	2,13463	0,00402	2,12554	0,00579
90°	10		2,14353		2,13061		2,11975	
p			2,13650	-0,01275	2,12478	-0,01242	2,11484	-0,01217
90°			2,14925		2,13720		2,12701	
s			2,13896	-0,00897	2,12740	-0,01140	2,11761	-0,01340
90°			2,14793		2,13880		2,13101	
p-s				-0,00246		-0,00262		-0,00277
90°				0,00132		-0,00160		-0,00400
—	VJ01	150	2,38766	-0,00234	2,36756	-0,00291	2,35004	-0,00341
90°	01		2,39000		2,37047		2,35345	
p			2,37840	-0,00046	2,35849	-0,00060	2,34113	-0,00072

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
90°			2,37886		2,35909		2,34185	
s			2,38592	0,00421	2,36596	0,00330	2,34856	0,00249
90°			2,38171		2,36266		2,34607	
p-s				-0,00752		-0,00747		-0,00743
90°				-0,00285		-0,00357		-0,00422
—			2,47771	-0,00070	2,62035	0,01855	2,55926	0,01481
90°			2,47841		2,60180		2,54445	
p	VJ02		2,46062	0,00171	2,60156	0,00000	2,54021	-0,00161
90°		150	2,45891		2,60156		2,54182	
s	04		2,46457	**0,02747**	2,60674	0,00107	2,54552	0,00051
90°			2,43710		2,60567		2,54501	
p-s				-0,00395		-0,00518		-0,00531
90°				**0,02181**		-0,00411		-0,00319
—			2,52861	0,03007	2,64438	0,00242	2,57525	0,00223
90°			2,49854		2,64196		2,57302	
p	VJ03		2,50298	-0,00997	2,61989	-0,01301	2,55160	-0,01272
90°		150	2,51295		2,63290		2,56432	
s	07		2,51284	-0,00452	2,63184	-0,00179	2,56384	-0,00150
90°			2,51736		2,63363		2,56534	
p-s				-0,00986		-0,01195		-0,01224
90°				-0,00441		-0,00073		-0,00102
—			2,39826	0,00229	2,37794	0,00111	2,36022	0,00004
90°			2,39597		2,37683		2,36018	
p	VJ05		2,39893	0,00427	2,37744	0,00375	2,35867	0,00328
90°		150	2,39466		2,37369		2,35539	
s	01		2,39036	-0,00201	2,37064	-0,00147	2,35345	-0,00098
90°			2,39237		2,37211		2,35443	
p-s				0,00857		0,00680		0,00522
90°				0,00229		0,00158		0,00096
—			2,48959	0,00239	2,63107	0,02211	2,56776	0,01823
90°			2,48720		2,60896		2,54953	
p	VJ06		2,48334	0,00279	2,61933	-0,00048	2,55641	0,00012
90°		150	2,48055		2,61981		2,55629	
s	04		2,47400	-0,00476	2,61506	0,01440	2,55274	0,01158
90°			2,47876		2,60066		2,54116	
p-s				0,00934		0,00427		0,00367
90°				0,00179		0,01915		0,01513
—	VJ07	150	2,55728	0,00448	2,67089	0,00192	2,59777	0,00108
90°			2,55280		2,66897		2,59669	
p	07		2,54345	0,00253	2,65948	0,00175	2,58680	0,00113
90°			2,54092		2,65773		2,58567	
s			2,53879	0,00083	2,65359	-0,00090	2,58203	-0,00121
90°			2,53796		2,65449		2,58324	

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
p-s 90°				0,00466 0,00296		0,00589 0,00324		0,00477 0,00243
— 90°	VJ09 01	150	2,39214 2,39374	-0,00160	2,37380 2,37508	-0,00128	2,35785 2,35885	-0,00100
p 90°			2,39611 2,39216	0,00395	2,37614 2,37258	0,00356	2,35875 2,35553	0,00322
s 90°			2,41082 —	— —	2,38717 —	— —	2,36650 —	— —
p-s 90°				-0,01471 —	— —	-0,01103 —	— —	-0,00775 —
— 90°	VJ10 04	150	2,47607 2,47420	0,00187	2,62270 2,61904	0,00366	2,56253 2,56017	0,00236
p 90°			2,46116 2,45952	0,00164	2,60725 2,60474	0,00251	2,54849 2,54609	0,00240
s 90°			2,45957 2,46080	-0,00123	2,60672 2,60712	-0,00040	2,54866 2,54782	0,00084
p-s 90°				0,00159 -0,00128		0,00053 -0,00238		-0,00017 -0,00173
— 90°	VJ11 10	150	2,51249 2,51399	-0,00150	2,65556 2,65687	-0,00131	2,58878 2,58940	-0,00062
p 90°			— —	—	— —	—	— —	—
s 90°			— 2,49311	— —	— 2,63835	— —	— 2,57297	— —
p-s 90°				— —		— —		— —
— 90°	VL01 01	170	2,42846 2,42514	0,00332	2,40655 2,40399	0,00256	2,38743 2,38555	0,00188
p 90°			2,40352 2,40345	0,00007	2,38201 2,38183	0,00018	2,36326 2,36296	0,00030
s 90°			2,41297 2,41077	0,00220	2,39143 2,39004	0,00139	2,37262 2,37197	0,00065
p-s 90°				-0,00945 -0,00732		-0,00942 -0,00821		-0,00936 -0,00901
— 90°	VL02 04	170	2,38450 2,39138	-0,00688	2,36801 2,37387	-0,00586	2,35368 2,35864	-0,00496
p 90°			2,40792 2,39889	0,00903	2,38561 2,37795	0,00766	2,36609 2,35965	0,00644
s 90°			2,40686 2,40929	-0,00243	2,38665 2,38897	-0,00232	2,36899 2,37121	-0,00222
p-s 90°				0,00106 -0,01040		-0,00104 -0,01102		-0,00290 -0,01156
—	VL03	170	2,40893	-0,00309	2,39007	-0,00398	2,37365	-0,00478

	Amost. / Pos.	Esp. Nom. [nm]	*n* (458)	*Δn*	*n* (550)	*Δn*	*n* (633)	*Δn*
90°	07		2,41202		2,39405		2,37843	
p			2,40268	-0,02797	2,38138	-0,02167	2,36280	-0,01604
90°			2,43065		2,40305		2,37884	
s			—	—	—	—	—	—
90°			2,41626		2,39500		2,37642	
p-s				—		—		—
90°				0,01439		0,00805		0,00242
—	VL05	170	2,43167	-0,00592	2,41366	-0,00556	2,39801	-0,00525
90°			2,43759		2,41922		2,40326	
p			2,40830	—	2,38701	—	2,36845	—
90°			—		—		—	
s	01		2,41738	-0,00239	2,39717	-0,00048	2,37957	0,00125
90°			2,41977		2,39765		2,37832	
p-s				-0,00908		-0,01016		-0,01112
90°				—		—		—
—	VL06	170	2,38166	-0,00170	2,36587	-0,00171	2,35218	-0,00172
90°			2,38336		2,36758		2,35390	
p			—	—	—	—	—	—
90°			—		—		—	
s	04		2,40662	-0,00269	2,38733	-0,00229	2,37051	-0,00194
90°			2,40931		2,38962		2,37245	
p-s				—		—		—
90°				—		—		—
—	VL07	170	2,39770	0,00124	2,38263	0,00369	2,36962	0,00587
90°			2,39646		2,37894		2,36375	
p			—	—	—	—	—	—
90°			—		—		—	
s	07		2,40513	-0,00140	2,38621	-0,00076	2,36975	-0,00019
90°			2,40653		2,38697		2,36994	
p-s				—		—		—
90°				—		—		—

A partir dos dados das tabelas acima, foram selecionadas as 9 amostras que apresentaram as maiores diferenças de índice de refração, reunidas na tabela 34. Na sua primeira coluna estão discriminados os nomes das amostras conforme a seguinte convenção:

—- 90° → Maior diferença entre as medidas em posição normal e girada

p-s → Maior diferença entre as medidas com polarizador nas posições *p* e *s*

p-s_90° → Idem ao anterior mas para as amostras giradas

Tab. 33: Resultados dos filmes que apresentaram maiores diferenças de índice de refração.

Amostra	Espessura nominal [nm]	Δn (458)	Δn (550)	Δn (633)	Rank (550 nm)
VA01 (p-s)	180	0,0335	0,0278	0,0235	3
VB01 (p-s)	180	0,0198	0,0252	0,0289	5
VB07 (p-s)	180	0,0175	0,0221	0,0257	8
VC07 (p-s_90°)	180	0,0413	0,0367	0,0316	1
VE01 (— - 90°)	120	0,0312	0,0302	0,0292	2
VE13 (— - 90°)	120	0,0246	0,0245	0,0243	6
VH07 (p-s_90°)	90	0,0180	0,0210	0,0236	9
VH08 (p-s)	90	0,0231	0,0223	0,0217	7
VH09 (p-s)	90	0,0244	0,0255	0,0265	4

A seguir, estão apresentados os gráficos dos espectros de transmitância para as 9 amostras da tabela 34. Nas figuras estão sobrepostos os espectros para a condição de máxima diferença nos índices de refração.

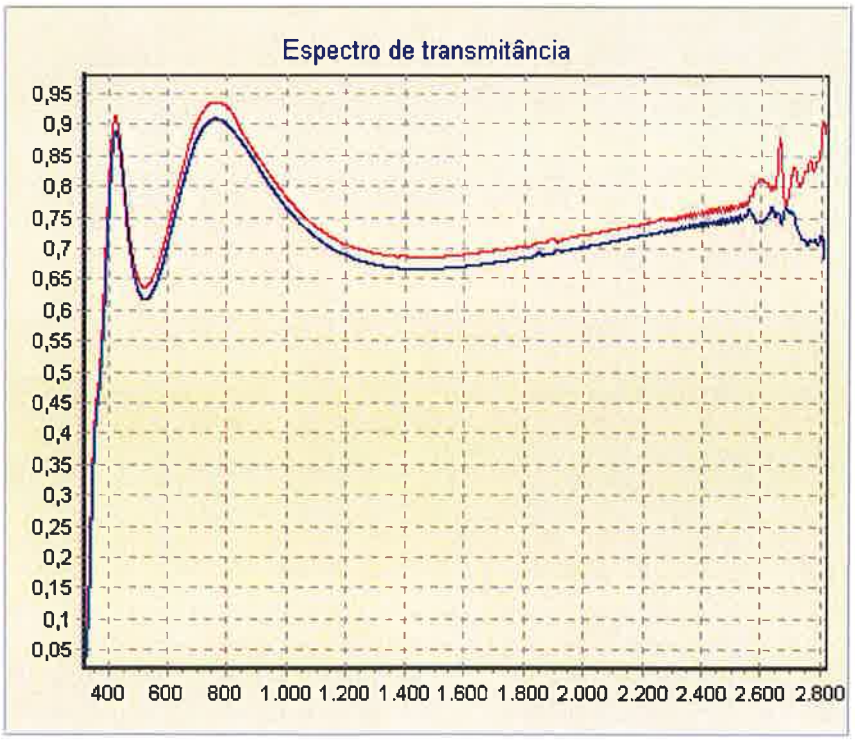


Fig. 112: VC07 p_90° (vermelho) e s_90° (azul). Rank 1.

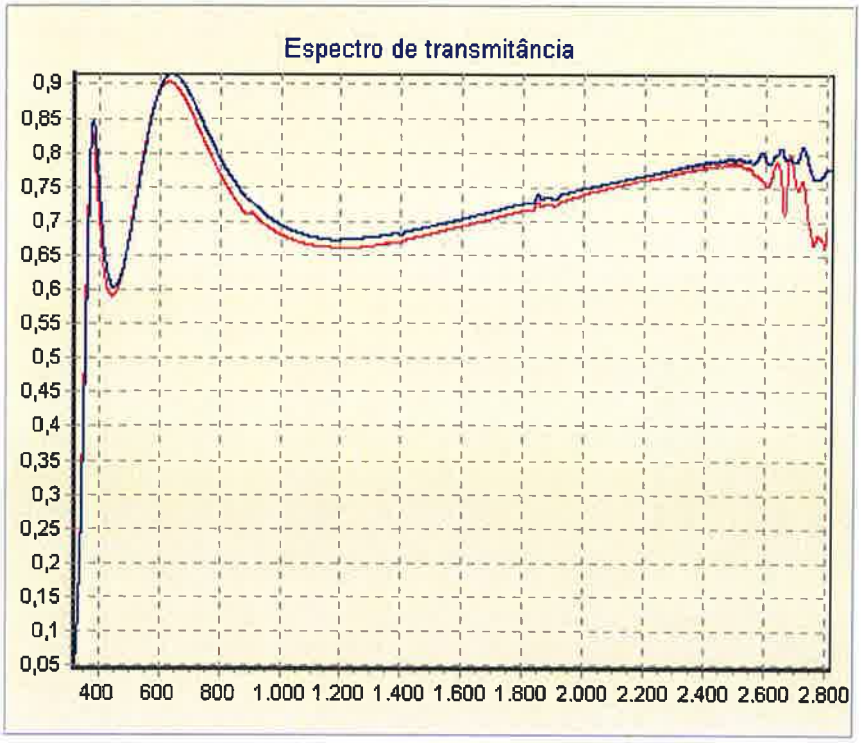


Fig. 113: VA01 p (vermelho) e s (azul). Rank 3.

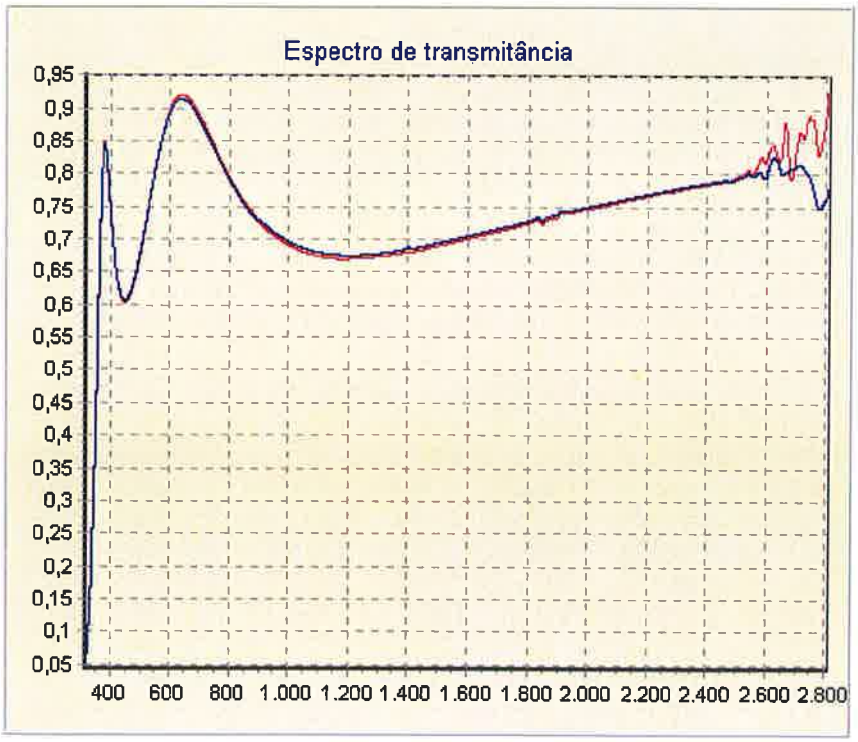


Fig. 114: VB01 p (vermelho) e s (azul). Rank 5.

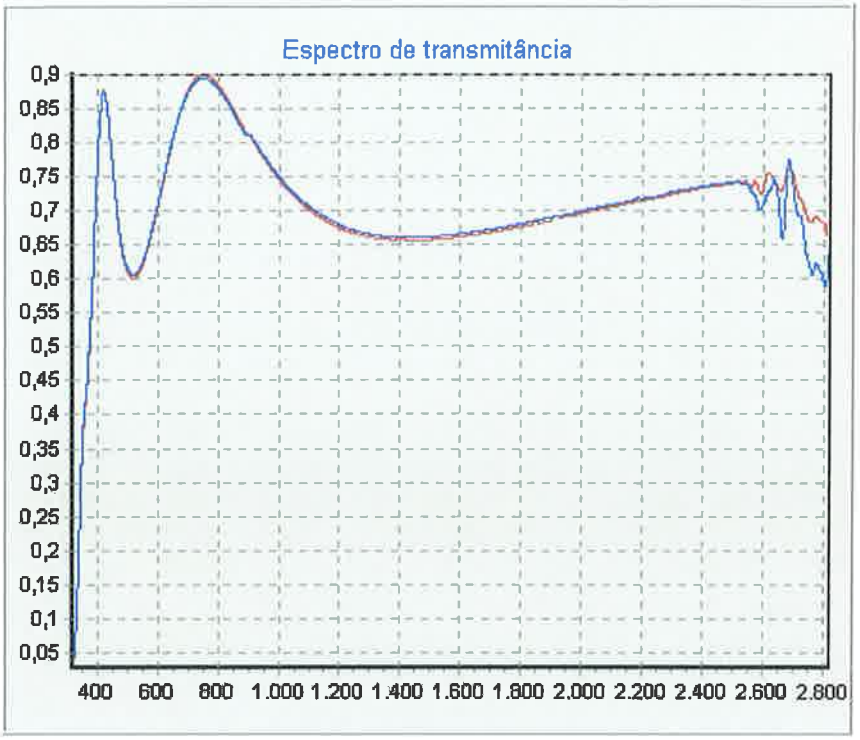


Fig. 115: VB07 p (vermelho) e s (azul). Rank 8.

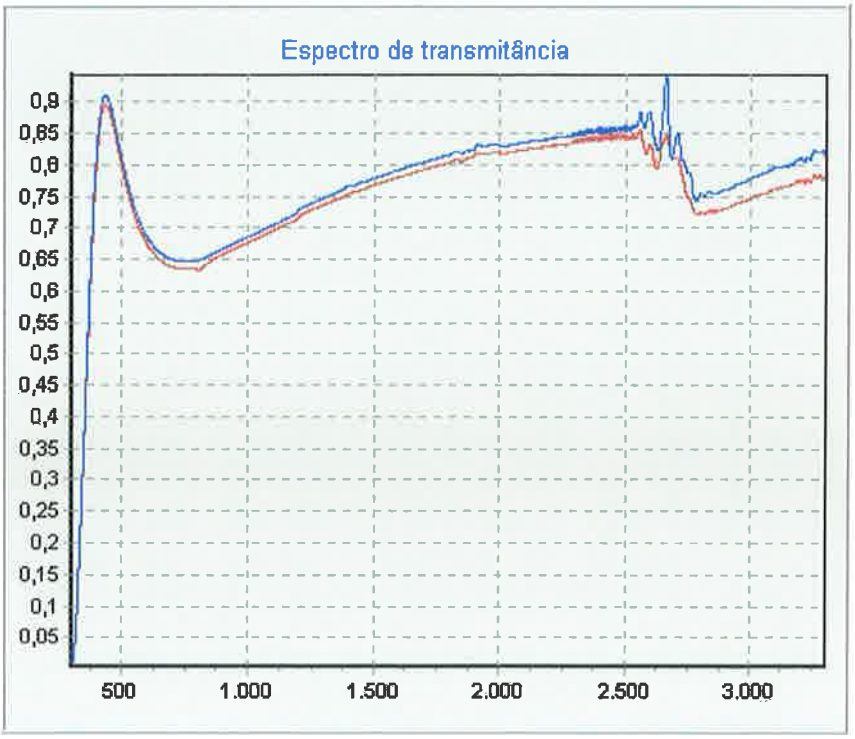


Fig. 116: VE01 sem polarização (vermelho) e girado de 90° (azul). Rank 2.

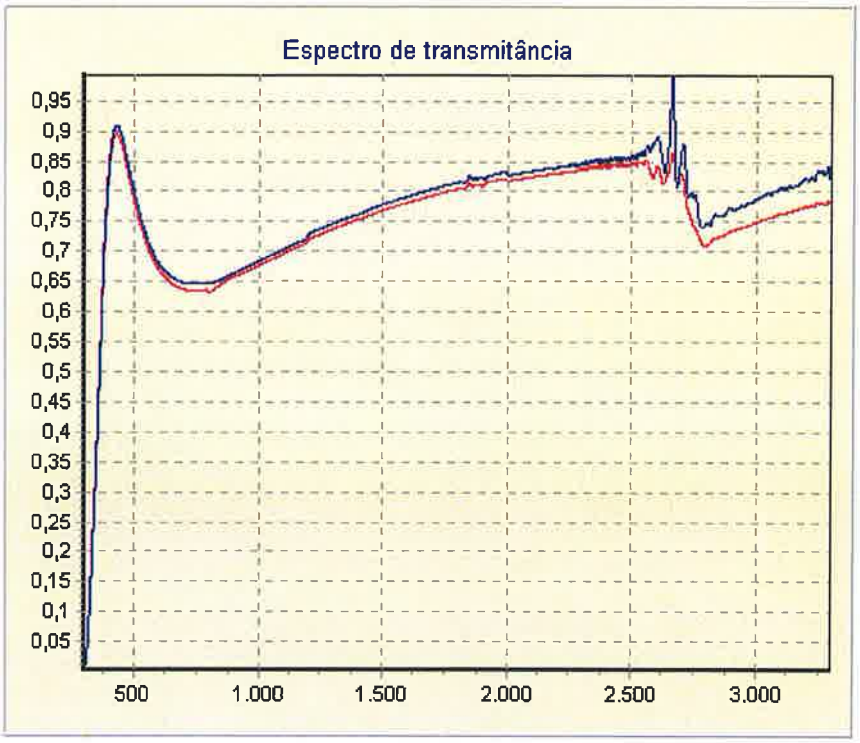


Fig. 117: VE13 sem polarização (vermelho) e girado de 90° (azul). Rank 6.

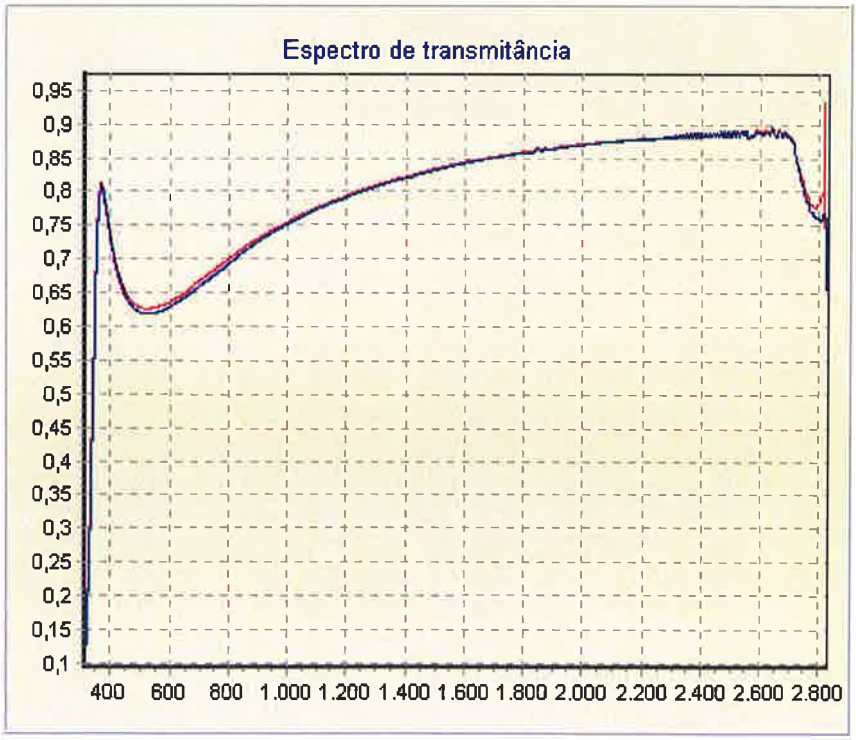


Fig. 118: VH07 p_90° (vermelho) e s_90° (azul). Rank 9.

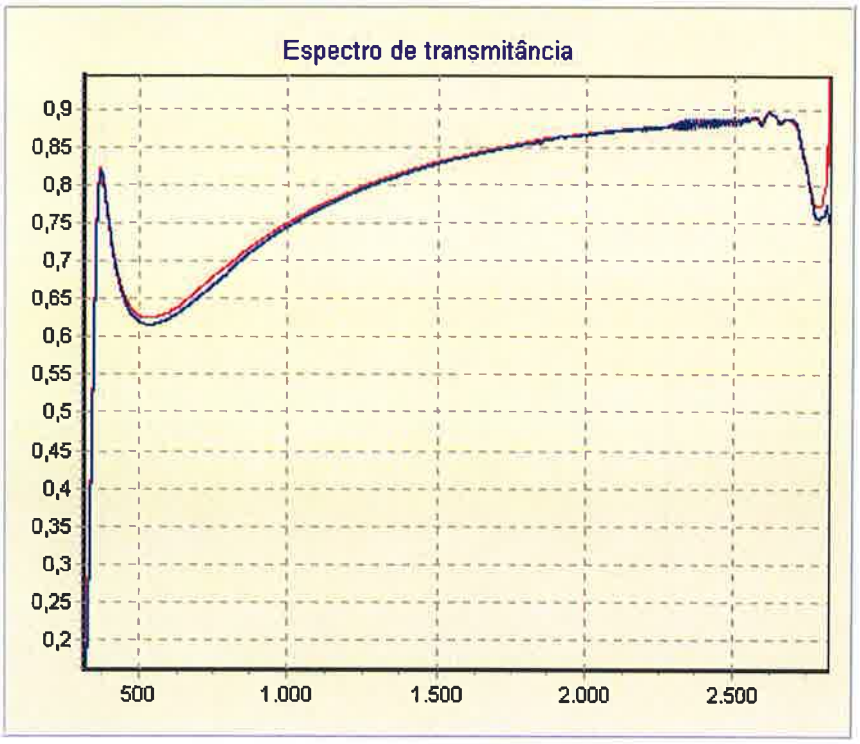


Fig. 119: VH08 p (vermelho) e s (azul). Rank 7.

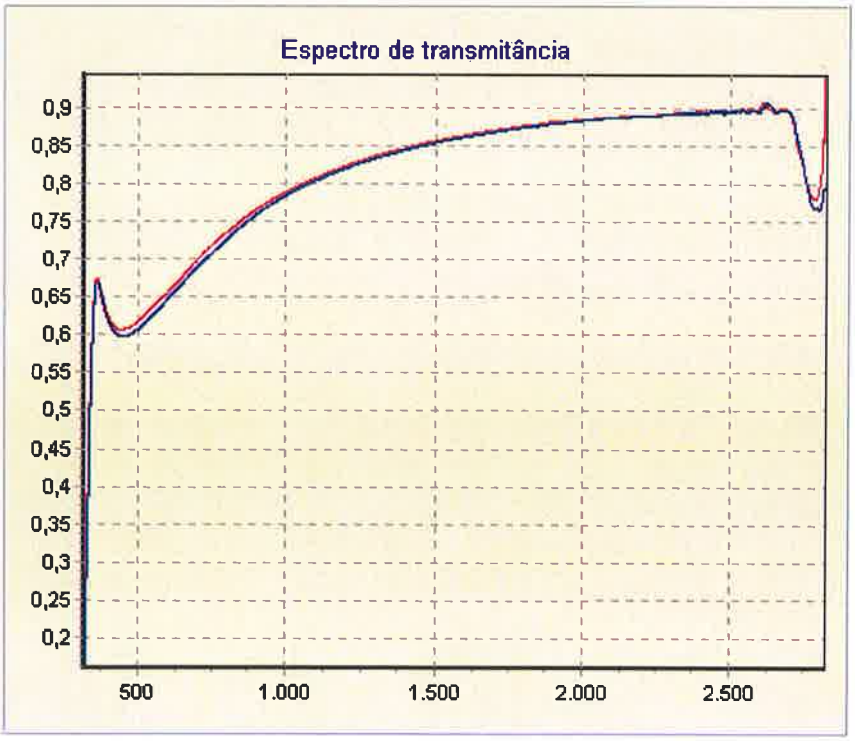


Fig. 120: VH09 p (vermelho) e s (azul). Rank 4.

ANEXO III – Insucessos na obtenção dos filtros de interferência

Dentre todos os mais de 30 filtros implementados, divididos em 8 receitas, apenas os da receita 02 (conforme Apêndice I) apresentaram propriedades interessantes de polarização (apesar de vários outros a terem apresentado em menor ou maior grau), e somente os das receitas 05 e 06 conseguiram posicionar corretamente o pico de transmitância máxima no comprimento de onda de projeto.

Essas dificuldades surgiram devido às características do equipamento de deposição. Por ser um sistema de malha aberta, só podemos controlar as condições de deposição e esperar que as variáveis às quais não temos acesso (ou mesmo conhecimento) não interfiram na reprodutibilidade do processo.

Pelos resultados apresentados nas secções seguintes, vemos que isso não se deu, ou seja, apesar de se repetir uma dada receita, obtivemos ao final resultados bastante discrepantes.

A obtenção de filtros polarizadores mostrou-se ser uma tarefa bastante complicada que requer um alto nível de controle das suas variáveis pois pequenas variações de espessura, ou no índice de refração dos filmes pode levar a filtros inviáveis. Pode-se contornar a necessidade de um maior rigor no controle do processo adotando-se sistemas de controle de malha fechada, ou seja, utilizando-se um equipamento capaz de monitorar as variáveis de interesse e interromper a deposição no momento adequado.

Para o presente trabalho, esse equipamento poderia ser um elipsômetro de transmissão acoplado ao equipamento de deposição, como foi delineado na conclusão desta tese.

Nas secções seguintes, vamos detalhar os resultados obtidos na análise dos filtros implementados para todas as receitas idealizadas, e não somente para as que resultaram em filtros funcionais e que já foram descritos no capítulo 7.

Como não foi possível a obtenção de filtros capazes de cancelar completamente uma das componentes de polarização da luz, incluímos ao final deste

anexo a demonstração de que tais filtros ainda podem ser empregados em sistemas PDI, bastando-se realizar uma calibração do sistema utilizando-se luz não-polarizada.

A.3.1 – Espectrofotometria dos filtros de interferência

O primeiro tipo de análise levada a efeito foi a comparação entre os espectros de transmitância para amostras típicas de cada uma das receitas sumarizadas detalhadamente em ordem cronológica no Apêndice I.

Todos os resultados obtidos podem ser vistos na figura 121.

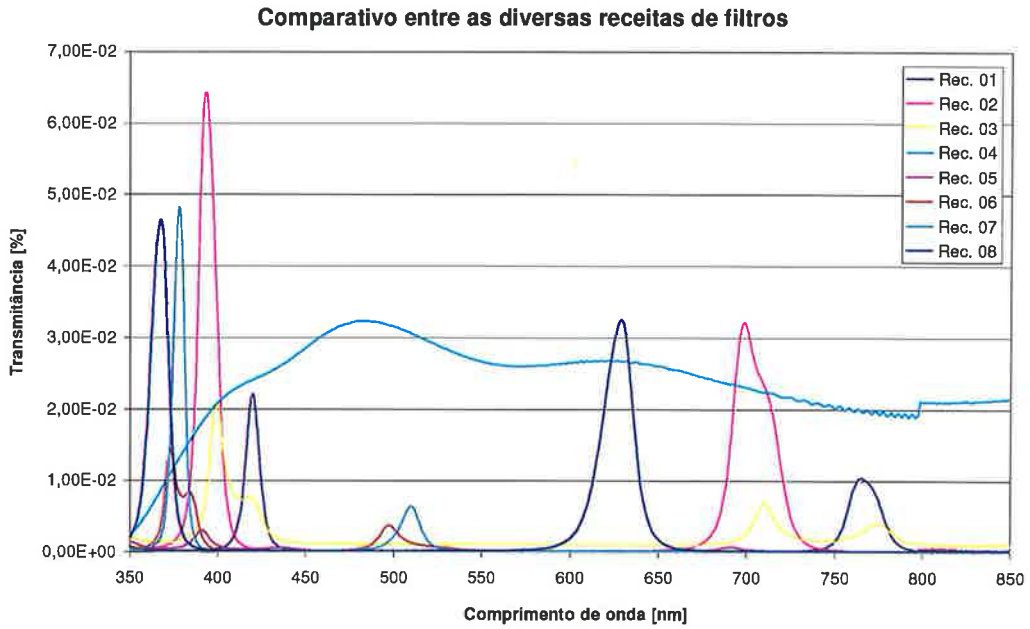


Fig. 121: Comparativo entre os resultados conseguidos para cada receita (veja receitas no apêndice I).

Todos os filtros implementados apresentaram um pico extra na região do violeta, o que para nós não é muito importante pois nessa região o Si não é um bom sensor (veja figura 48, no capítulo 5).

Como podemos ver a partir da figura 121, somente as receitas 06 e 07 conseguiram localizar um pico de transmitância próximo aos 500 nm projetado, e

ainda assim, a amplitude desse pico é bem menor do que a desejada. Todas as demais receitas apresentaram pico na região do vermelho (além de 620 nm).

A receita 04 sequer conseguiu gerar um filtro de interferência. Quanto à receita 08, o seu pico foi deliberadamente posicionado na região do vermelho com a finalidade de demonstrar que já possuímos o grau de controle adequado para produzir filtros de interferência com picos bem posicionados. Neste caso, procuramos reproduzir a segunda receita, já que os resultados então alcançados não se deveram a imposições das condições de processo, ao contrário da receita 08.

Para compreendermos os resultados apresentados na figura 121, precisamos lançar mão de outro tipo de análise que não somente a espectrofotometria. Precisamos determinar a espessura exata dos filmes obtidos para compreendermos o porquê deles não estarem corretamente posicionados (no caso das receitas 01 a 05). Outro parâmetro importante é a estequiometria do filme. Um filme com excesso de metal (baixo valor de x em TiO_x) poderia apresentar um alto fator de extinção (a parte imaginária do índice de refração) e isso poderia explicar a pequena intensidade transmitida quando comparada com o valor projetado (que não levou em conta a parte imaginária do índice de refração). Para o levantamento desses dados foi empregada a técnica de análise por RBS, cujos espectros são apresentados na próxima secção.

A figura 122 apresenta os valores de estequiometria em função da concentração planar, fator proporcional à espessura do filme, para ambas as cavidades mas apenas para os filtros mais bem sucedidos (receitas 02, 06, 07 e 08).

Comparando os gráficos das figuras 121 e 122 vemos que a suposição inicial (baseada numa estimativa de espessura a partir do valor de concentração planar corrigida pela reta de calibração apresentada no capítulo 7) de que as primeiras receitas apresentavam cavidades mais espessas que o desejado mostrou-se incorreta. Na verdade suas espessuras estavam aquém do necessário para posicionar o pico de transmitância em torno de 500 nm, como vemos pelo resultado alcançado nas receitas 06 e 07.

Por outro lado, a maior transmitância alcançada pelas duas primeiras receitas, e não mais igualada, a não ser pela última, provém da sua maior estequiometria (maior relação entre a proporção de O e Ti no filme), ou seja, as receitas posteriores

apresentam um excesso de metal, o que faz com que apresentem um maior coeficiente de extinção e portanto, uma menor transmitância.

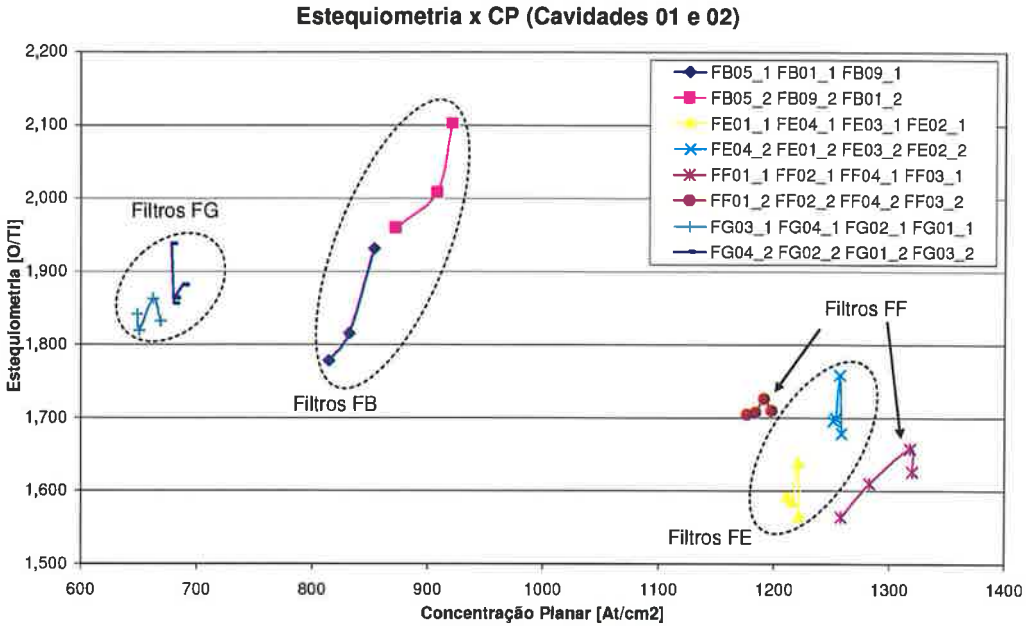


Fig. 122: Estequiometria dos filmes das duas cavidades ressonantes para as receitas 02 e 08 (maior estequiometria: > 1,8) e 06 e 07 (estequiometria < 1,8).

Infelizmente, constatamos que o controle da estequiometria do filme obtido está além das possibilidades do equipamento empregado. Por outro lado, como podemos ver pela dispersão dos parâmetros, um melhor controle das variáveis foi conseguido ao longo das tentativas e, ao final, foi possível obter-se dois filtros com picos de transmitância bem posicionados, sendo que uma pequena alteração na receita provocou apenas um pequeno efeito no resultado final, ao contrário do que observamos em todas as outras tentativas, mesmo quando uma receita era simplesmente repetida. O correto posicionamento do pico de transmitância na região do vermelho para a receita 08 também atesta esse maior grau de controle conseguido ao longo das tentativas.

A análise acima apenas contabiliza questões como posição do pico e transmitância máxima, sem uma preocupação com o comportamento birrefringente do filtro. Para isso teremos que observar os resultados na figura 123.

Da análise da figura 123 vemos que os filtros implementados segundo a receita 01 não são capazes de filtrar a luz em função do seu nível de polarização, como era de se esperar já que ambas as cavidades foram depositadas segundo o mesmo ângulo.

Já os filtros da receita 02 apresentaram uma boa seletividade entre os dois estados de polarização, apesar de os picos estarem mal posicionados.

Dado um problema de escala, para analisarmos os resultados dos filtros implementados segundo as receitas 06 e 07, devemos recorrer à figura 124 que representa uma ampliação do detalhe da figura 123.

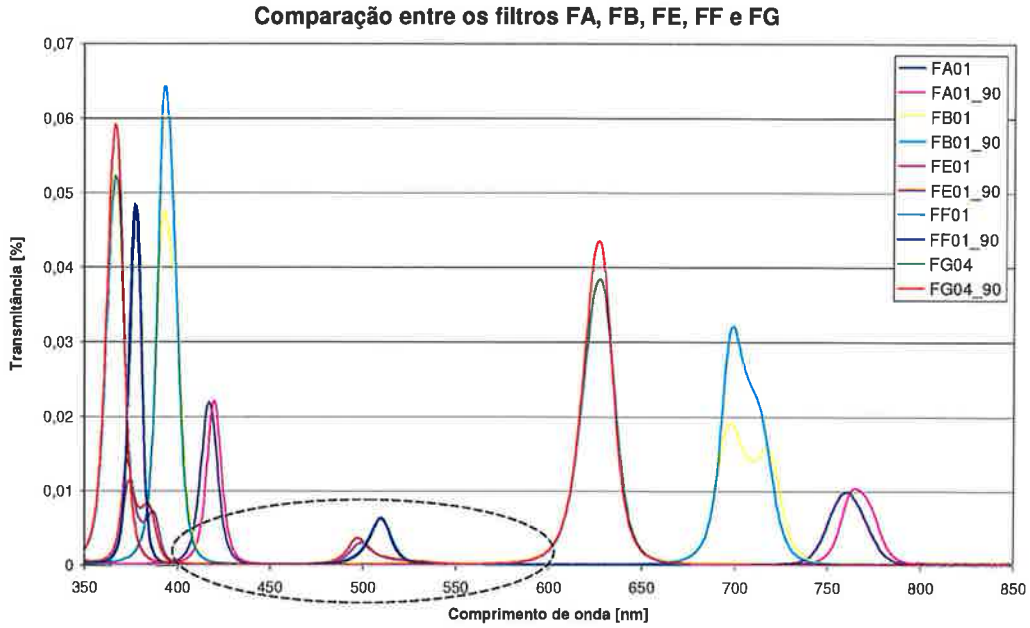


Fig. 123: Características de birrefringência (capacidade de polarização) nos filtros implementados.

O resultado global para esses dois últimos filtros é o de uma redução na capacidade de polarização em relação ao resultado obtido para os filtros FB, especialmente para a receita 07 (filtros FF).

Explicações para isso vão desde a incapacidade para se reproduzir a estequiometria dos filmes, e portanto os seus índices de refração, até uma variação

com relação à espessura projetada, o que também apresenta o mesmo efeito na redução do comportamento birrefringente do filtro.

Todos esses resultados apontam para uma deficiência na qualidade do processo, mormente a sua baixa reprodutibilidade, que pode ser imputada às características do equipamento empregado.

Ainda assim, fica aqui provada a possibilidade de se obter filtros polarizadores a partir de filmes finos depositados sob um determinado ângulo de inclinação.

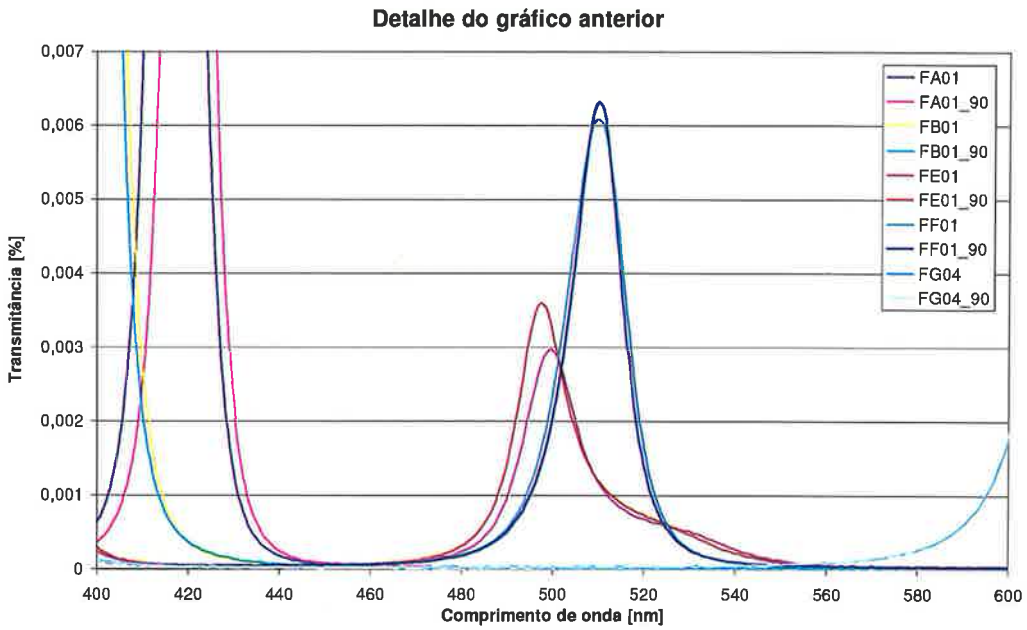


Fig. 124: Detalhe da figura 123.

Apesar dos desvios com relação ao projeto original, uma situação pior do que a ótima ainda assim pode produzir resultados bons, tudo dependendo das características do sensor. Também é possível uma etapa de calibração para ajustar-se as características dos filtros de interferência com as necessidades de discriminação em termos de polarização da luz.

A última secção deste anexo detalha este processo de calibração, onde as características dos filmes são compensadas eletronicamente.

Os mesmo comentários se aplicam à receita 08, restando ainda dizer que foi conseguido um melhor controle e conseqüente reprodução da estequiometria dos

filmes, mas como a espessura ainda não foi corretamente reproduzida, obtivemos um efeito de polarização menor do que aquele apresentado pela receita 02.

A figura 125 faz uma comparação entre essas duas receitas.

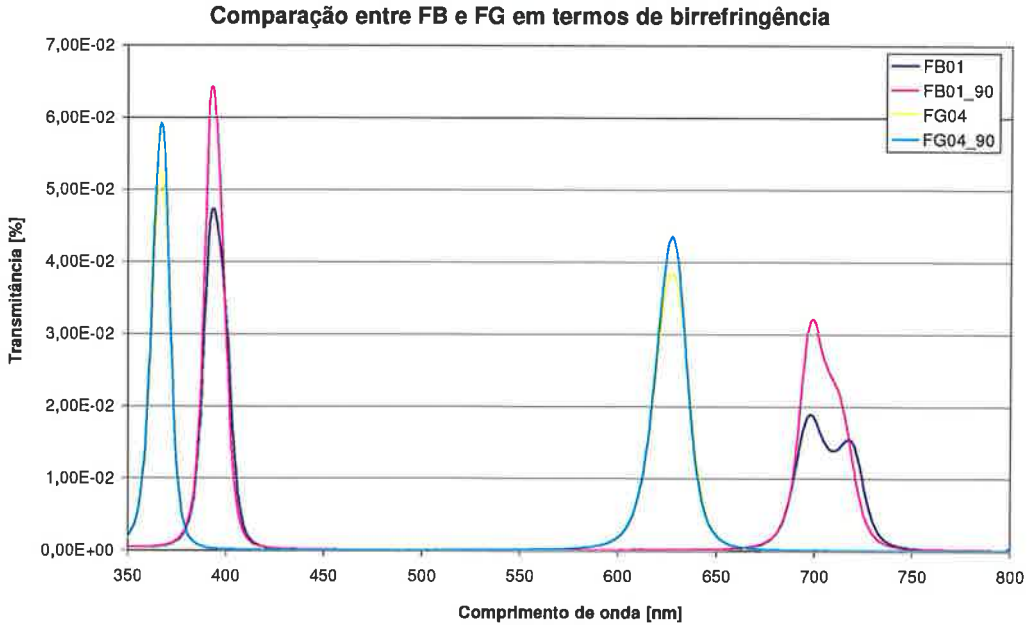


Fig. 125: Comparação entre os filtros das receitas 02 e 08.

Vemos assim, que a receita 08 ainda não foi capaz de reproduzir os resultados da receita 02, o que nos leva a crer que o equipamento de *Sputtering* utilizado não é capaz de controlar as condições de deposição com a precisão requerida. De fato, a simples existência de uma parte imaginária, o coeficiente de extinção, no índice de refração dos filmes já altera bastante o comportamento dos filtros projetados.

A figura 126 ilustra bem isso ao sobrepor o filtro teórico simulado para a colocação do pico de transmitância máxima em 699 nm (receita 02) para duas situações, onde na primeira o coeficiente de extinção k é nulo, e outra onde ele é de 0,022, valor compatível com aqueles apresentados no Anexo II. Devemos reparar, a partir da figura 126, que o aumento do coeficiente de extinção não desloca o pico de transmitância máxima, mas afeta consideravelmente o valor dessa transmitância e também afeta a relação entre as intensidades para cada um dos graus de polarização, diminuindo a sua diferença.

Para explicar o deslocamento dos picos ocorrido entre as receitas 02 e 08, é necessário levar-se em consideração que não só a espessura da cavidade de ressonância, mas também o(s) seu(s) índice(s) de refração afetam o posicionamento dos mesmos. Com isso, teríamos que saber com certeza, ou o valor do índice de refração, ou da espessura da cavidade de ressonância para que pudéssemos determinar o outro parâmetro através das simulações Matlab™.

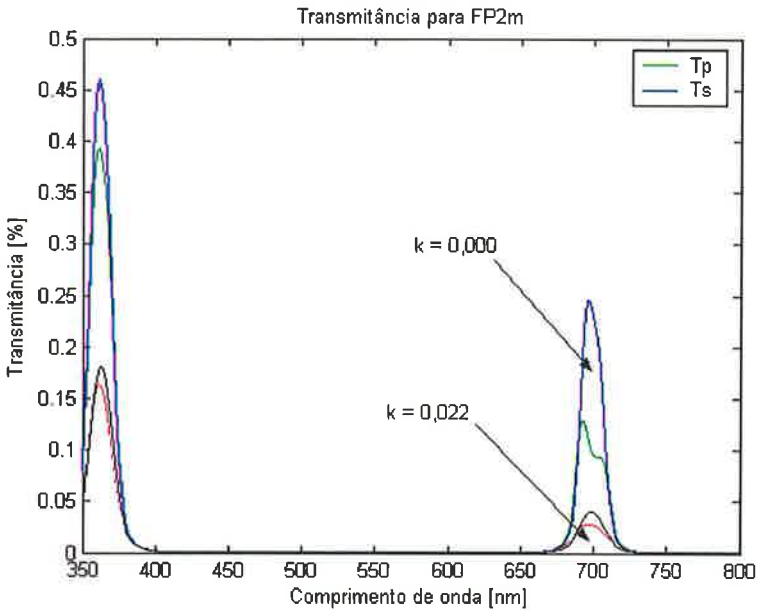


Fig. 126: Simulação para filtro com transmitância máxima em 699 nm e *k* nulo ou de 0,022.

As figuras 127 e 128 ilustram, por exemplo, o que a variação de um nanômetro na espessura de uma das cavidades do filtro Fabry-Perot pode fazer com relação ao comportamento polarizador.

Isso sugere que o controle das condições de processo deveria ser muito rigoroso para obtermos filtros perfeitamente reprodutíveis e nas características projetadas.

Outra possibilidade é a que é empregada em (Hodgkinson et al, 1997), ou seja, o monitoramento, através de um elipsômetro de transmissão, das características dos filmes depositados. Assim, pode-se concluir que um sistema de malha aberta, como o empregado durante esse trabalho, não apresenta condições adequadas para a produção de filtros polarizadores. O uso de um equipamento de malha fechada, no entanto, deveria ser suficiente para esse objetivo.

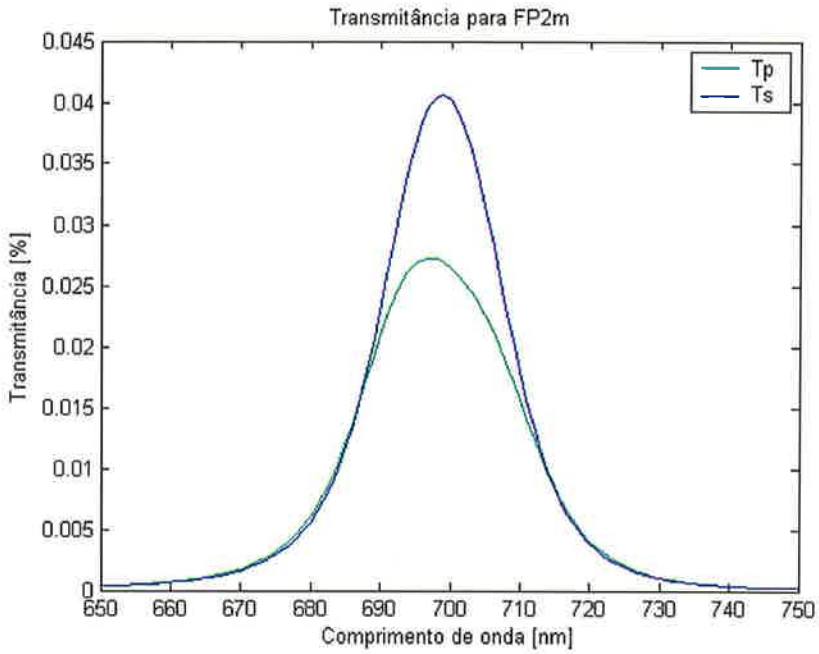


Fig. 127: Primeira cavidade 102 nm, segunda 104 nm. Ts/Tp = 1,49.

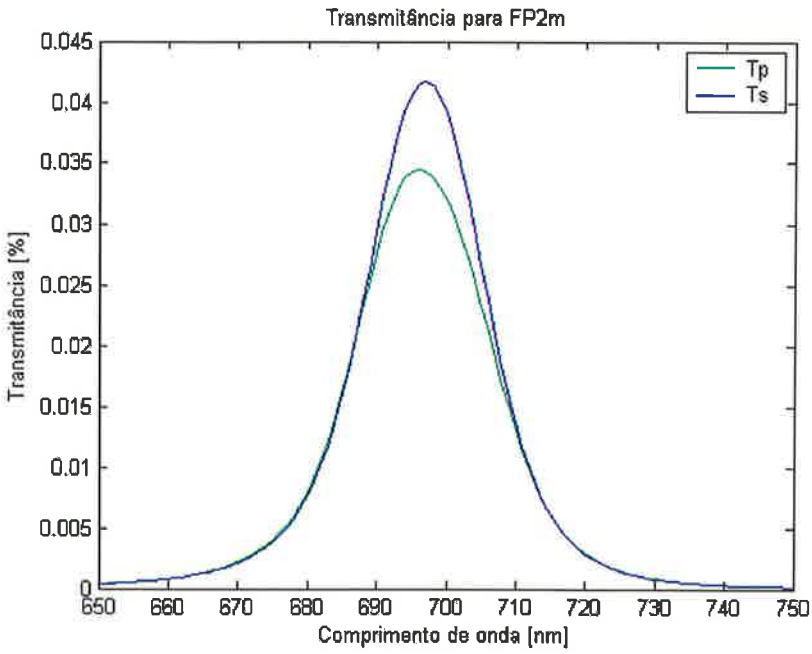


Fig. 128: Primeira cavidade 102 nm, segunda 103 nm. Ts/Tp = 1,21.

Apresentamos, na próxima secção, os espectros RBS dos quais foram extraídas as informações de estequiometria e concentração planar usadas nas discussões acima.

A.3.2 – Análise RBS dos filtros de interferência

A técnica de espectrofotometria sozinha não permitiria as discussões apresentadas na secção anterior, e por isso houvemos por bem apresentar alguns dos resultados da análise RBS dos filtros antes de apresentar os seus espectros propriamente que é o que faremos nesta secção.

Na seqüência, os espectros RBS são apresentados por receita. A partir da receita 03 são apresentados apenas os espectros obtidos para amostras localizadas na posição 01. O motivo disto é que, como vemos nos gráficos de amostras da segunda receita para posições diferentes de 01, não foi possível obter-se picos bem definidos, o que se refletiu na impossibilidade de se implementar filtros nessas posições.

A energia utilizada nas análises é de 2,9 MeV, suficientemente alta para promover uma melhor separação entre os picos, mas também para gerar reações nucleares que promovem o fenômeno da ressonância para alguns elementos, como o O por exemplo. Por esse motivo, as análises aqui efetuadas utilizaram o *software* SIMNRA® já citado anteriormente.

Além das amostras de filtros de 2 cavidades, ao final também são apresentados os espectros para filtros de 1 cavidade.

Esses filtros foram implementados neste estudo como uma forma de facilitar as simulações MATLAB™ já que um filtro de uma cavidade apenas apresenta menos parâmetros que devemos fazer convergir (uma espessura e um par de índices de refração, contra duas espessuras e dois pares de índices de refração para o caso dos filtros polarizadores de duas cavidades) para que possamos determinar se os resultados experimentais estão dentro das expectativas.

A diferença entre os filtros PA01 e PA06 é que este último foi implementado com o porta-amostras em rotação. Como vimos na secção anterior, essa rotação destrói as assimetrias colunares e impedem o surgimento da birrefringência de forma.

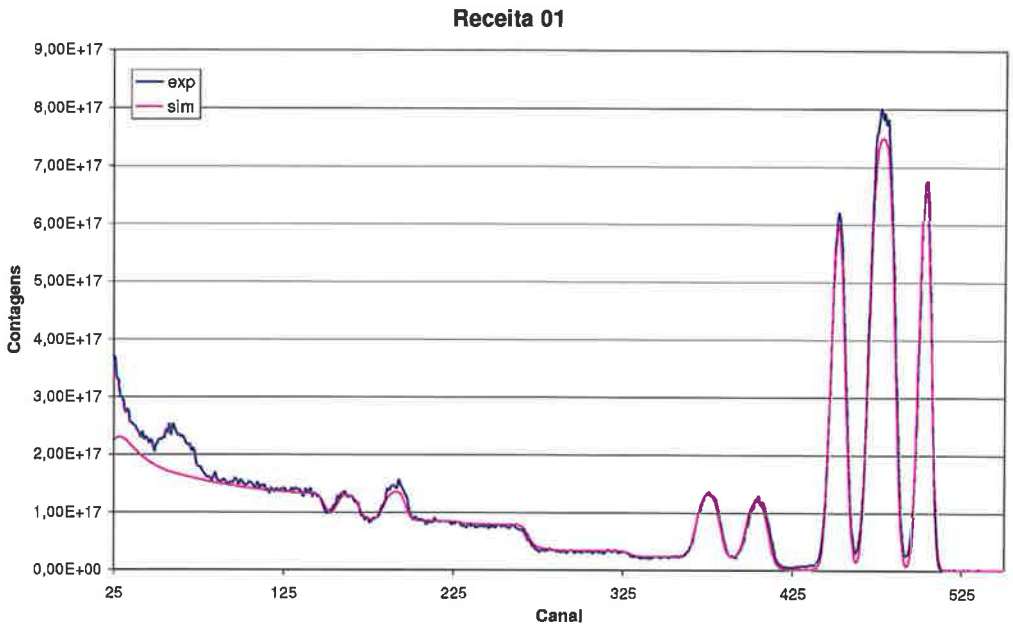


Fig. 129: Espectro para receita 01, posição 01.

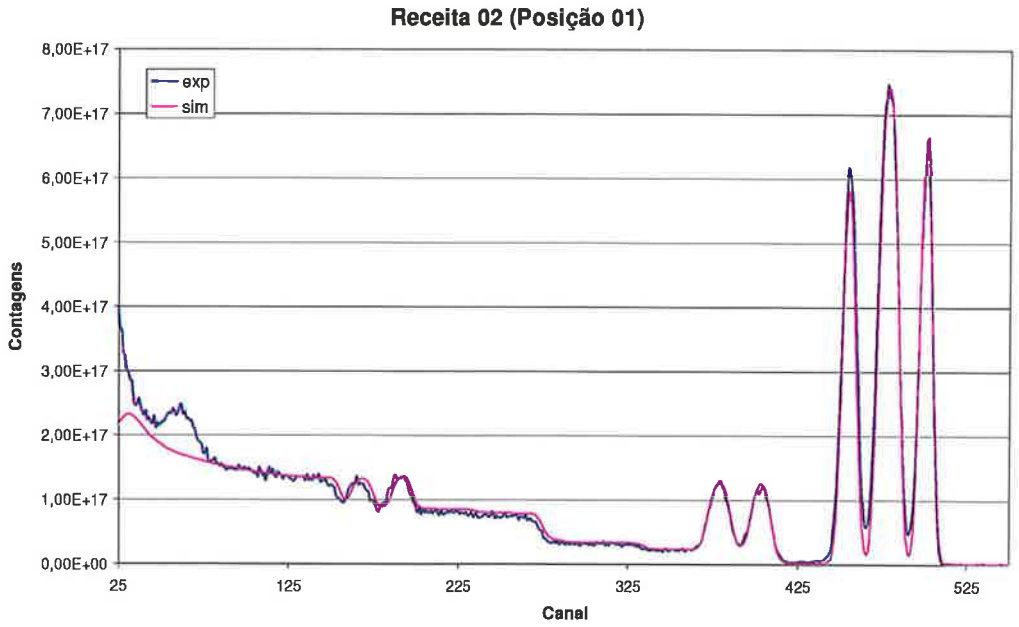


Fig. 130: Espectro para receita 02, posição 01.

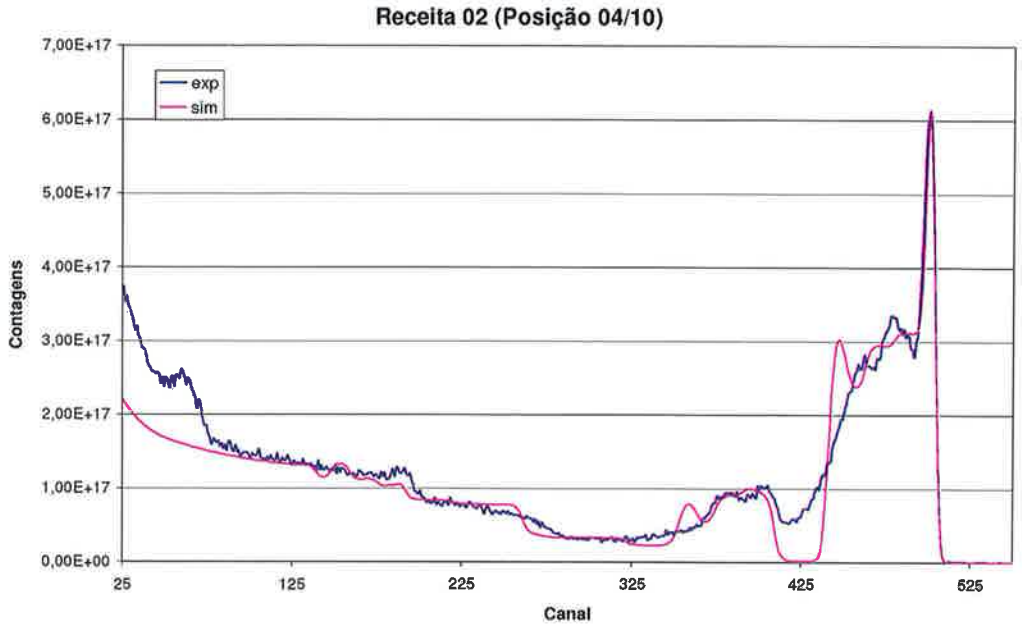


Fig. 131: Espectro para receita 02, posições 04 e 10.

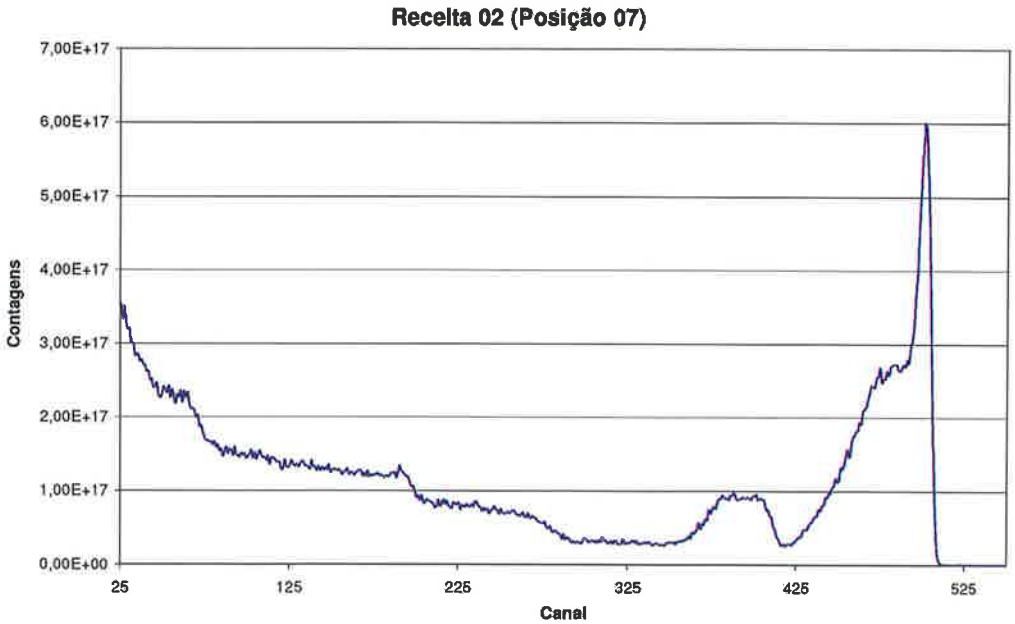


Fig. 132: Espectro para receita 02, posições 07.

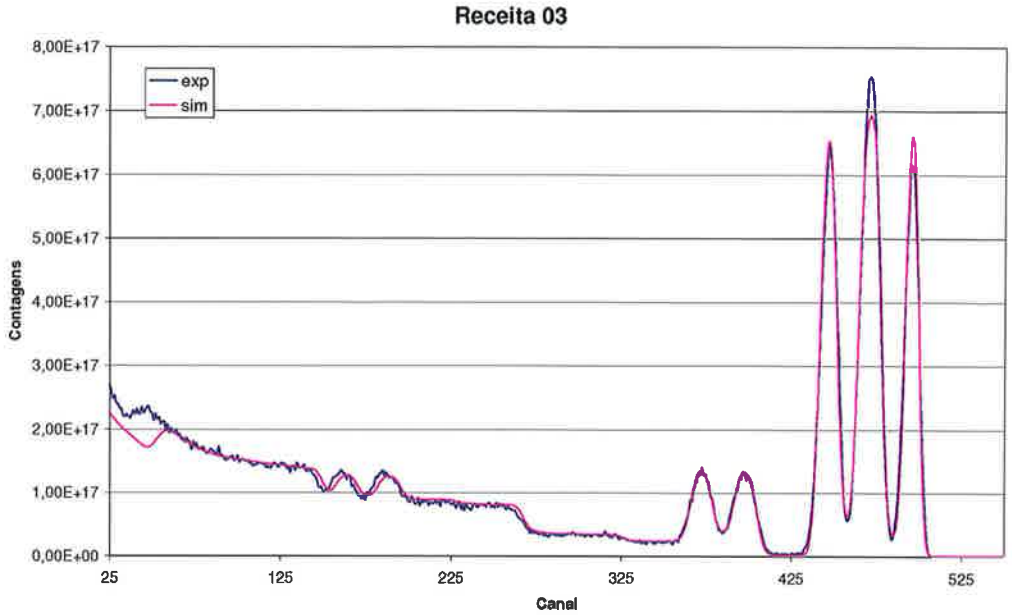


Fig. 133: Espectro para receita 03.

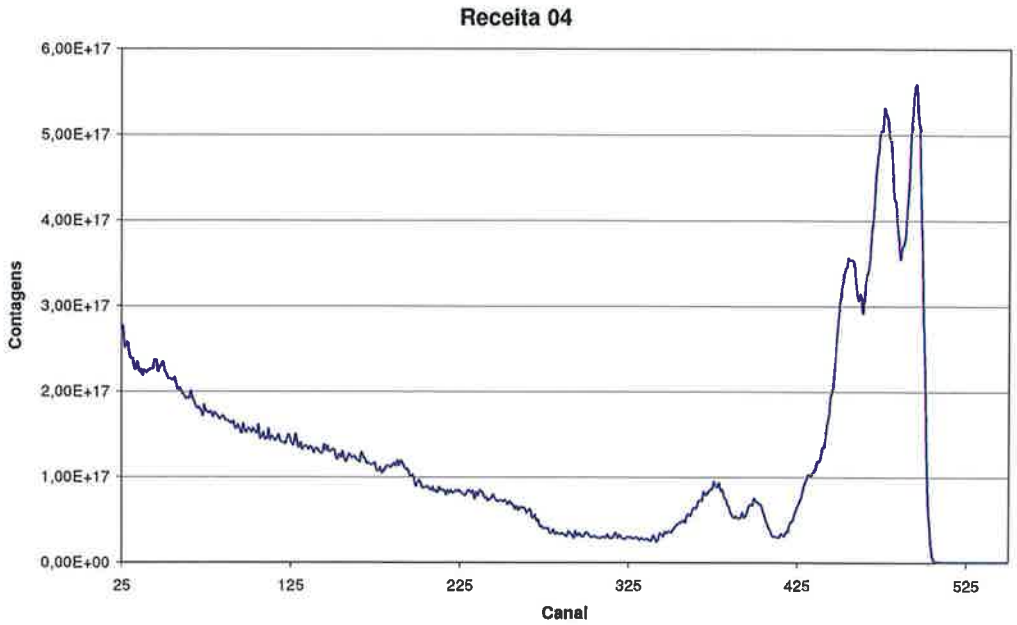


Fig. 134: Espectro para receita 04.

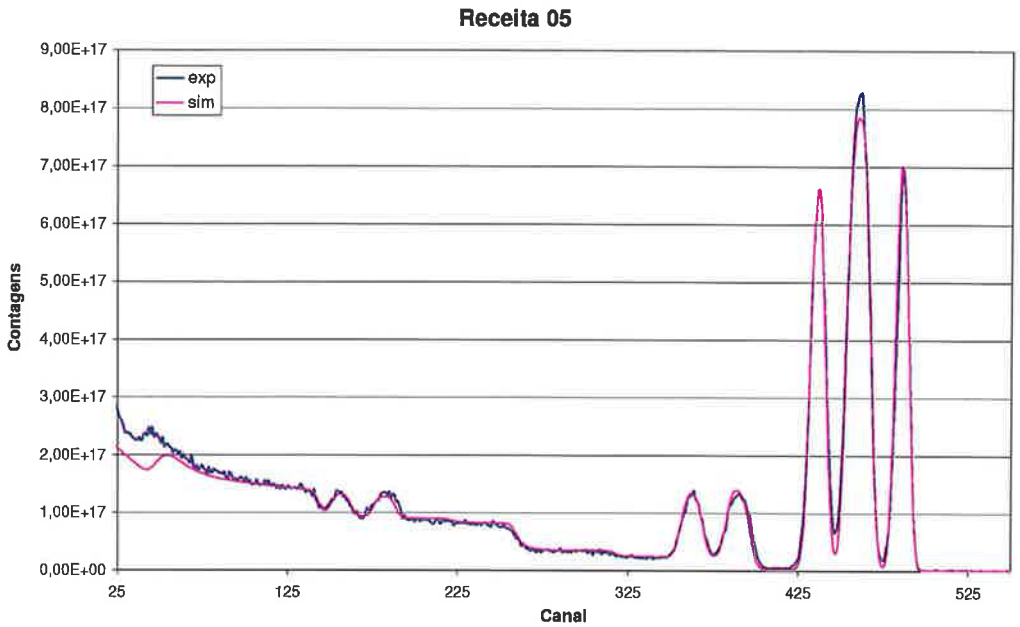


Fig. 135: Espectro para receita 05.

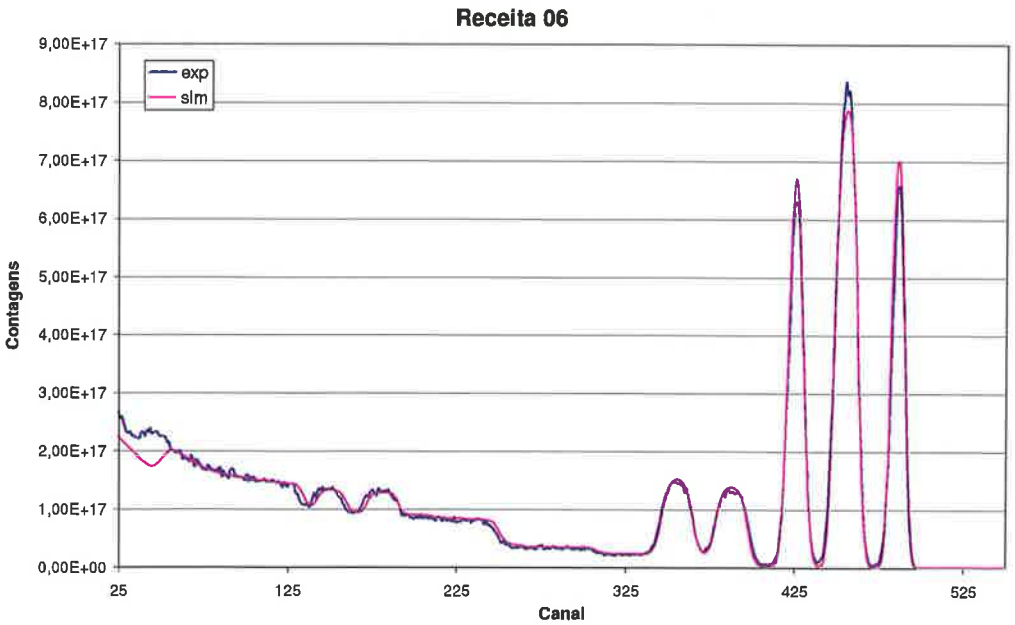


Fig. 136: Espectro para receita 06.

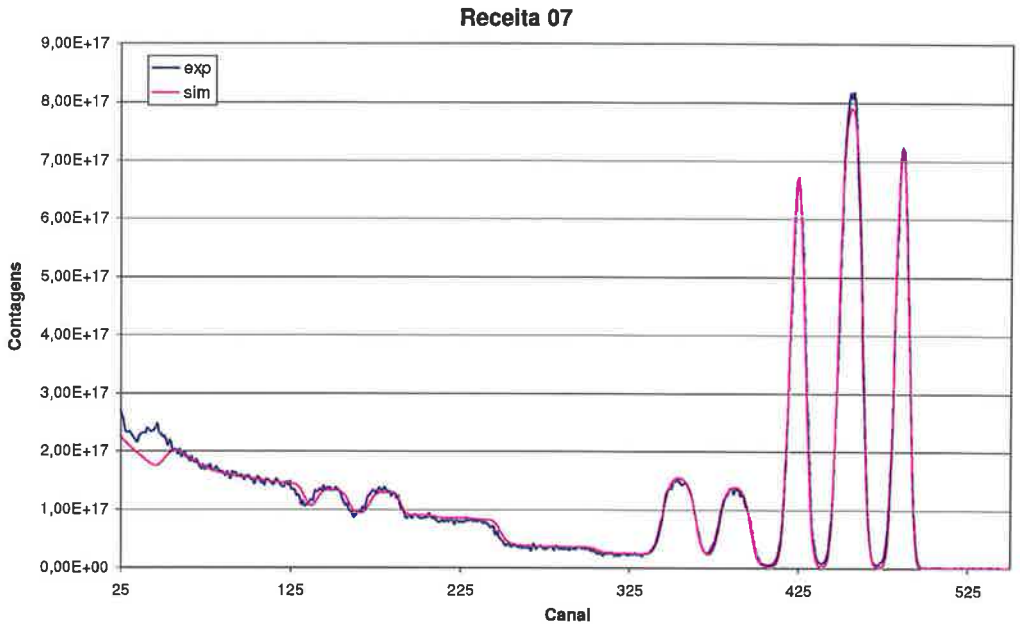


Fig. 137: Espectro para receita 07.

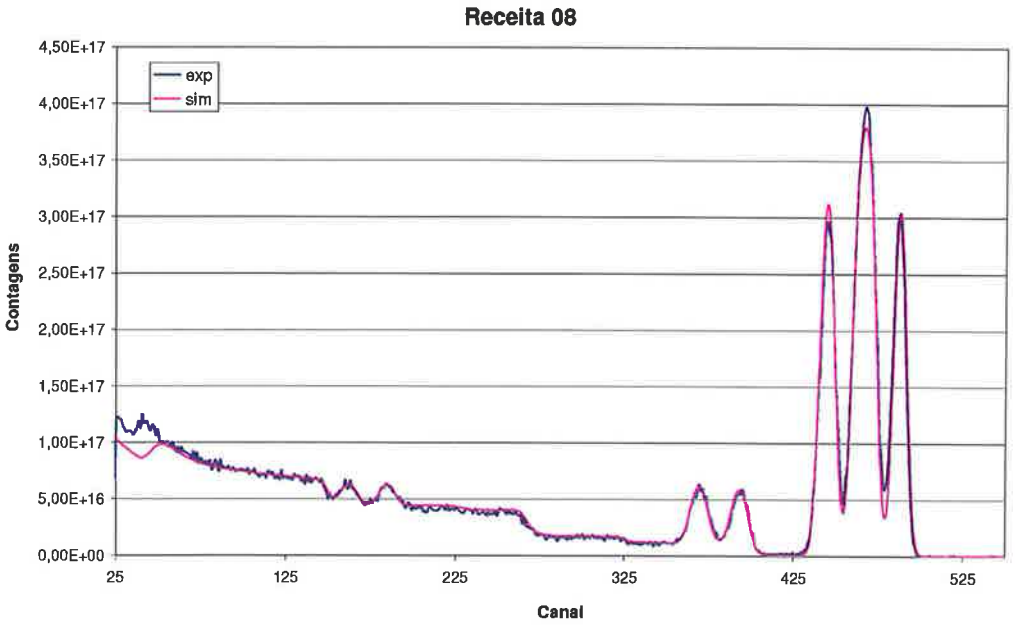


Fig. 138: Espectro para receita 08.

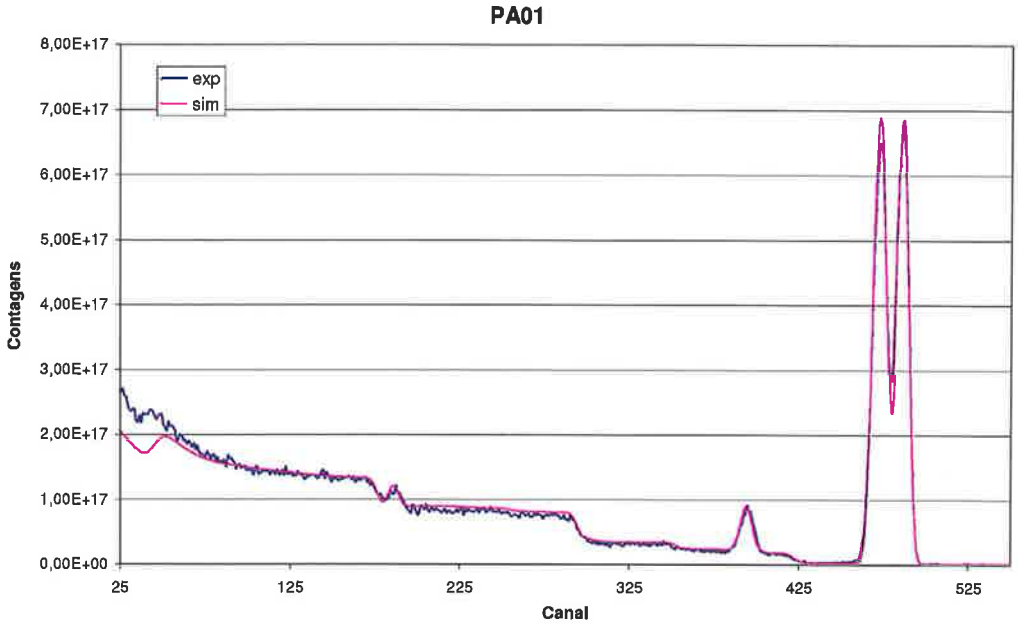


Fig. 139: Espectro para receita PA. Filtro de uma cavidade e espessura menor.

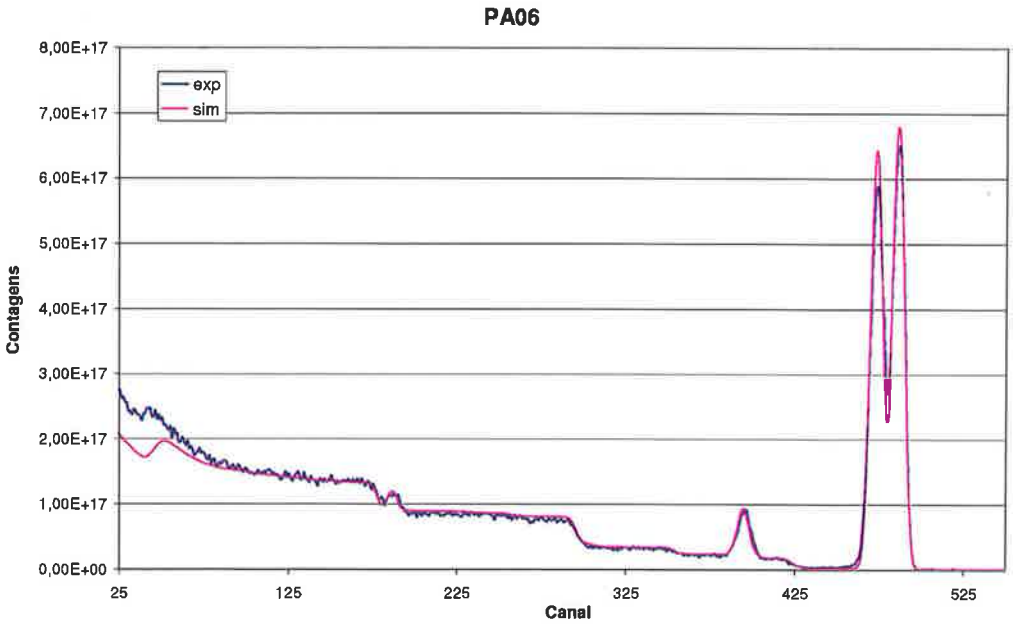


Fig. 140: Espectro para receita PA. Filtro de uma cavidade. Amostra com rotação.

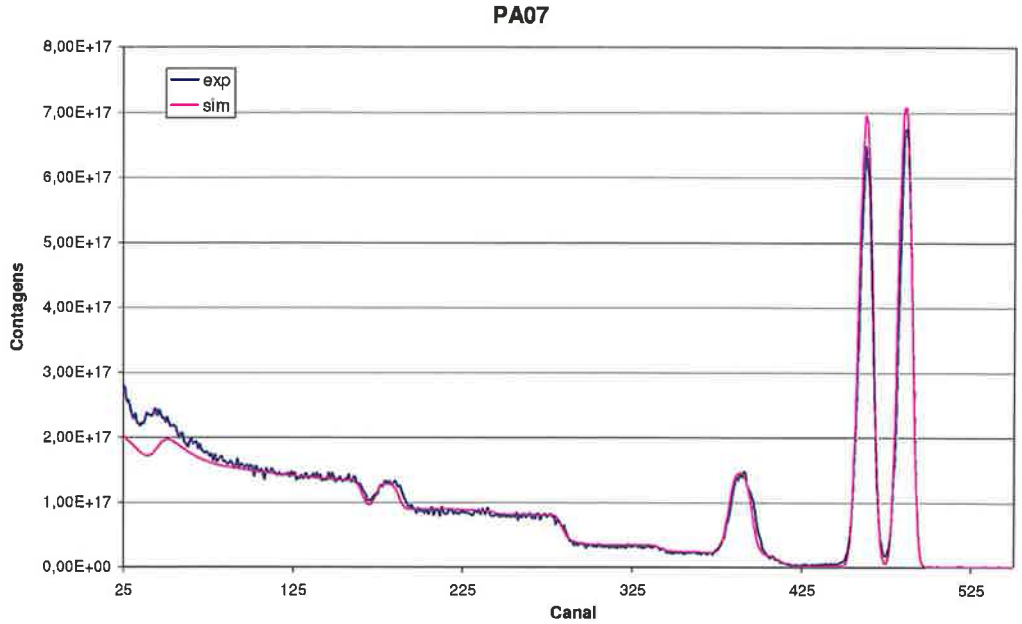


Fig. 141: Espectro para receita PA. Filtro de uma cavidade e espessura maior.

A.3.3 – Impossibilidade de cancelamento total de uma das componentes de polarização

Dos resultados obtidos, vimos que, mesmo para o melhor caso, não foi possível implementar nenhum filtro que cancelasse completamente uma das componentes de polarização da luz, conseguindo-se no máximo impor uma transmitância preferencial para uma delas. A etapa de simulação e projeto dos filtros (capítulo 5) mostrou que isso era, de fato, impraticável para a diferença entre os índices de refração, vistos pela luz em cada uma das polarizações ortogonais, conseguidos nas amostras deste trabalho (diferenças maiores tornariam possível o total cancelamento de uma das componentes, como se pode ver nas simulações para dados da literatura no capítulo 4).

Essa característica dos filtros obtidos neste trabalho, entretanto, não impossibilita o seu emprego em sistemas PDI, apenas requerendo que se faça uma calibração do sistema antes de seu uso.

Para essa etapa de calibração, suponha que a luz não-polarizada possa ser decomposta em duas componentes de polarização cruzada que apresentarão, em média, a mesma intensidade.

$$\begin{aligned} I_T &= 0{,}5 \cdot I_P + 0{,}5 \cdot I_S \\ \therefore I_P &= I_S = I \end{aligned} \qquad \text{(A.3.3-1)}$$

Suponha também que dispomos de 2 sensores acoplados a 2 filtros que apresentam transmitâncias diferentes para as polarizações *p* e *s*.

Numa operação de calibração, vamos aplicar valores diferentes de ganho para a saída de cada sensor e vamos verificar se existe algum valor para o qual, utilizando-se luz não-polarizada, a tensão de saída, que é a diferença entre as tensões de cada sensor, possa ser anulada.

$$\begin{aligned} S_1 &= k_1 \cdot (I \cdot x + I \cdot y) \\ S_2 &= k_2 \cdot (I \cdot x' + I \cdot y') \end{aligned} \qquad \text{(A.3.3-2)}$$

onde, k_1 e k_2 são os ganhos associados aos sensores S_1 e S_2, I é a intensidade da luz para cada estado de polarização, x é a transmitância para polarização p no filtro 1, y é a transmitância para polarização s no filtro 1 e x' e y' são os correspondentes para o filtro 2.

O sinal de PDI, que nos interessa, é obtido a partir da subtração das tensões de saída de cada um dos sensores, assim teríamos:

$$S_1 - S_2 = I \cdot k_1 \cdot (x + y) - I \cdot k_2 \cdot (x' + y') \qquad \text{(A.3.3-3)}$$

Eliminando a constante I e fazendo a diferença igual a zero (calibração para luz não-polarizada) temos:

$$\begin{aligned} & k_1 \cdot x - k_2 \cdot x' + k_1 \cdot y - k_2 \cdot y' = 0 \Rightarrow \\ & k_1 \cdot x + k_1 \cdot y = k_2 \cdot x' + k_2 \cdot y' \Rightarrow \\ & k_1 = \left(\frac{x' + y'}{x + y} \right) \cdot k2 \end{aligned} \qquad \text{(A.3.3-4)}$$

Como tanto x e y quanto x' e y' variam de 0 a 1, concluímos que sempre existirá um ganho k_1 relacionado com k_2, ambos positivos e maiores do que 0, conforme a relação A.3.3-4.

Concluída a etapa de calibração, vamos averiguar qual seria o comportamento desse sistema com relação à luz polarizada.

Primeiramente para luz com polarização tipo p:

$$\begin{aligned} I_T &= 1 \cdot I_P + 0 \cdot I_S \\ \therefore I_P &= I \end{aligned} \qquad \text{(A.3.3-5)}$$

Nessa caso, usando a relação A.3.3-4 para os valores dos ganhos, teríamos:

$$\begin{gathered} S_1 = k_2 \cdot \left(\frac{x'+y'}{x+y}\right) \cdot (I \cdot x + 0 \cdot y) \Rightarrow S_1 = I \cdot k_2 \cdot x \cdot \left(\frac{x'+y'}{x+y}\right) \\ \text{e} \\ S_2 = k_2 \cdot (I \cdot x' + 0 \cdot y') \Rightarrow S_2 = I \cdot k_2 \cdot x' \end{gathered} \qquad \text{(A.3.3-6)}$$

Multiplicando S_1 e S_2 por $(x + y)$ temos:

$$\begin{gathered} S_1 = I \cdot k_2 \cdot x \cdot (x'+y') \\ \text{e} \\ S_2 = I \cdot k_2 \cdot x' \cdot (x+y) \end{gathered} \qquad \text{(A.3.3-7)}$$

Em A.3.3-7, como a luz utilizada apresenta polarização p e como os sensores utilizam ganhos determinados durante a etapa de calibração para anular a tensão na saída apenas com a luz polarizada, vamos eliminar a constante I e fazer a subtração das saídas S_1 e S_2. Na seqüência vamos igualar essa diferença a 0 para verificarmos se existe alguma possibilidade, mesmo após a calibração, de a tensão de saída ser nula indicando, erradamente, que não há polarização na luz medida. Repare que k_2 também é uma constante que pode ser eliminada, ou seja, k_2 pode assumir qualquer valor sem que isso prejudique a interpretação do estado de polarização da luz na entrada do sistema.

$$
\begin{aligned}
&x\cdot(x'+y')-x'\cdot(x+y)=0\Rightarrow\\
&x\cdot(x'+y')=x'\cdot(x+y)\\
&\therefore\frac{x}{x+y}=\frac{x'}{x'+y'}
\end{aligned}
\qquad \text{(A.3.3-8)}
$$

O resultado apresentado na equação A.3.3-8 mostra que, após a calibração, a tensão de saída somente se anulará na presença de luz polarizada tipo p se e somente se a relação $\frac{x}{x+y}=\frac{x'}{x'+y'}$ for obedecida. Isso somente ocorrerá no caso de os filtros serem iguais, o que não é possível pois estamos admitindo que $x \neq x'$ e $y \neq y'$, ou que ocorra uma coincidência improvável já que os valores das transmitâncias são semelhantes mas não iguais.

Para luz de entrada com polarização tipo s (eq. A.3.3-9), e seguindo um equacionamento análogo, teremos:

$$
\begin{aligned}
&I_T=0\cdot I_P+1\cdot I_S\\
&\therefore I_S=I
\end{aligned}
\qquad \text{(A.3.3-9)}
$$

$$
\begin{aligned}
&S_1=k_2\cdot\left(\frac{x'+y'}{x+y}\right)\cdot(0\cdot x+I\cdot y)\Rightarrow S_1=I\cdot k_2\cdot y\cdot\left(\frac{x'+y'}{x+y}\right)\\
&\qquad\qquad\text{e}\\
&S_2=k_2\cdot(0\cdot x'+I\cdot y')\Rightarrow S_2=I\cdot k_2\cdot y'
\end{aligned}
\qquad \text{(A.3.3-10)}
$$

$$
\begin{aligned}
&S_1=I\cdot k_2\cdot y\cdot(x'+y')\\
&\qquad\text{e}\\
&S_2=I\cdot k_2\cdot y'\cdot(x+y)
\end{aligned}
\qquad \text{(A.3.3-11)}
$$

$$
\begin{aligned}
&y\cdot(x'+y')-y'\cdot(x+y)=0\Rightarrow\\
&y\cdot(x'+y')=y'\cdot(x+y)\\
&\therefore\frac{y}{x+y}=\frac{y'}{x'+y'}
\end{aligned}
\qquad \text{(A.3.3-12)}
$$

A relação A.3.3-12 é análoga à A.3.3-8 e portanto para ela valem os mesmos comentários.

Casos onde a luz apresenta valores intermediários de polarização (eq. A.3.3-13) também seguirão um equacionamento semelhante ao já desenvolvido para cada componente em particular. Também existirá uma condição de anulação (falsa ausência de polarização), mas novamente, tal ocorrência seria extremamente improvável.

$$I_T = \alpha \cdot I_P + \beta \cdot I_S \qquad \text{(A.3.3-13)}$$

Com isso concluímos que a anulação completa de uma das componentes de polarização da luz por parte do filtro polarizador não é realmente necessária, mas, se não ocorrer, o sistema deverá ser calibrado através da aplicação de um ganho variável às saídas dos sensores, sob luz não-polarizada, até que a saída do sistema se anule.

Esse resultado em si nos permite demonstrar a perfeita funcionalidade do sistema proposto neste trabalho, mesmo que os resultados apresentados pelos filtros implementados não tenham sido iguais aos valores projetados teoricamente e mesmo que as diferenças entre as transmitâncias devidas a cada um dos filtros não seja razoavelmente grande.

BIBLIOGRAFIA

ABELÈS, F. *Optical properties of metallic films*. In: **Physics of thin films**. New York, ed. Academic Press, 1971, 6 v, p. 151-202.

ALVAREZ-HERRERO, A. et. al. Ellipsometric *characterization and influence of relative humidity on TiO_2 layers optical properties*. **Thin Solid Films**, 349, p. 212-219, 1999.

AUDET, S. A.; SCHOONEVELD, E. M. AND MIDDELHOEK, S. *High-purity silicon sensor array for imaging soft X-Ray and infrared radiation.* **International Electron Devices Meeting 1989. Technical Digest**, p. 177-180, 1989.

BAL, G AND MOSCOSO, M. *Theoretical and numerical analysis of polarization for time-dependent radiative transfer equations*. **Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer**, 70, p. 75-98, 2000.

BLUM, RICK S. AND KASSAM, SALEEM A. *On the asymptotic relative efficiency of distributed detection schemes.* **IEEE Transactions on Information Theory**, 41 (2), March 1995.

BLUM, RICK S. AND KASSAM, SALEEM A. *Optimum distributed detection of weak signals in dependent sensors.* **IEEE Transactions on Information Theory**, 38 (3), May 1992.

BOMZON, Z.; KLEINER, V. AND HASMAN, E. *Space-variant polarization state manipulation with computer-generated subwavelength metal stripe gratings*. **Optics Communications**, 192, p. 169-181, Jun. 2001.

BURKOVETS, D. N.; USHENKO, Y. A AND USHENKO, A. G. *Wavelet analysis of the polarization structure of biospeckle fields of statistical and multifractal phase-inhomogeneous layers*. **Optics and spectroscopy**, 94 (1), p. 141-148, January 2002.

CALAZA, C; et al. *A surface micromachining process for the development of a medium-infrared tunable Fabry-Perot interferometer.* **Sensors and actuators A**, 113, p. 39-47, 2004.

COJOCARU, E. *Omnidirectional reflection from finite periodic and Fibonacci quasi-periodic multilayers of alternating isotropic and birefringent thin films*. **Applied optics**, 41 (4), p. 747-755, February 2002.

J. H. CORREIA; G. DE GRAAF; S. H. KONG; M. BARTEK AND R. F. WOLFFENBUTTEL. *Single-chip CMOS optical microspectrometer*. **Sensors and Actuators A**. 82, p. 191-197, 2000.

CAPUTO, D. AND CESARE, G. *Amorphous silicon switching device for high-resolution two-color photodetector matrix*. **Sensors and Actuators A**. 78, p. 108-113, 1999.

DAKKA, A. et. al. *Optical study of titanium dioxide thin films prepared by R. F. Sputtering*. **M. Journal of Condensed Matter**, v. 2, n. 2, 1999.

DEKI, S. et. al. *Titanium (IV) oxide thin films prepared from aqueous solution*. **Chemistry Letters**, p. 433-434, 1996.

DIENER, J. et. al. *Planar silicon-based light polarizers*. **Optics Letters**, 29 (2), p. 195-197, Jan. 2004.

FOSSUM, E. R. *CMOS active pixel image sensors*. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, 395, p. 291-297, 1997.

FOWLES, G. R. **Introduction to modern optics**. Dover publications, 2ª. ed. New York, 1989.

GEOFREY, C. Clayton, et al. *The first spectropolarimetric study of the wavelength dependence of interstellar polarization in the ultraviolet*. **The Astrophysical Journal**. 385, p. L53-L57, Feb. 1992.

GIBSON, U. J. *Ion-beam processing of optical thin films*. In: **Physics of thin films**. New York, ed. Academic Press, 1987, 13 v, p. 109-147.

GOODMAN, JOSEPH W. *Introduction to Fourier Optics*. **Electrical and Computer Engineering Series**, McGraw-Hill, 2ª Ed., 1988.

GORI, F. *Measuring Stokes parameters by means of a polarization grating*. **Optics Letters**, v. 24, n. 9, p. 584-586, 1999.

GAAF, G. DE; WOLFFENBUTTEL, R. F. *Smart optical sensor systems in CMOS for measuring light intensity and colour*. **Sensor and Actuators A**, 67, p. 115-119, 1998.

GREEN, A. M.; GEVAUX, D. G. AND PHILIPS, C. C. *Analytical method for the optical modeling of resonant-cavity-enhanced photodiodes.* **Semiconductor science and technology**, 19, p. 673-679, 2003.

GUILBERT, L; SALVESTRINI, J. P.; HASSAN, H. AND FONTANA, M. D. *Combined effects due to phase, intensity and contrast in electrooptic modulation: application to ferroelectric materials.* **IEEE Journal of Quantum Electronics**, 35 (3), March 1999.

HARIHARAN, P., **Basics of interferometry**. Boston, ed. Academic Press, 1992.

HEROLD, M., et. al. *Electro-optic Pockels and Kerr effects for the determination of $\chi^{(2)}$ and $\chi^{(3)}$: thin films of side-chain polymers containing dimethylaminonitrostilbene and of the polydiacetylene poly-(butoxycarbonylmethyleneurethane).* **Applied Optics**, 34 (6), February 1995.

HOCTOR, RALPH T. AND KASSAM, SALEEM A. *Array redundancy for active line arrays.* **IEEE Transactions on Image Processing**, 5 (7), p. 1179-1183, July 1996.

HODGKINSON, I. J. AND WU, Q. h., **Birefringent thin films and polarizing elements**. Singapore, ed. World Scientific, 1997.

HOLLAND, L. **Vacuum deposition of thin films**. Chapman & Hall Ltd. London 1956.

HOROWITZ, F. AND MENDES, S. B. *Envelope and waveguide methods: a comparative study of PbF_2 and CeO_2 birefringent films.* **Applied Optics**, 33 (13), May 1994.

JELLISON, G. E., Jr; AND MODINE, F. A. *Optical absorption of silicon between 1.6 and 4.7 eV at elevated temperatures.* **Applied Physical Letters**, 41 (2), p. 180-182, 1982.

JIANG, I. M. et. al. *Dynamic formation of columnar lattices in magnetic fluid thin films subjected to oscillating perpendicular magnetic fields.* **Journal of Applied Physics**, 96 (1), p. 860-863, Jul. 2004.

KALAYJIAN, Z. K.; ANDREOU, A. G. *Integrated imaging linear polarimeter.* **ISA Transactions**, 38, p. 203-209, 1999.

KAMINSKA, K. AND ROBBIE, K. *Birefringent omnidirectional reflector.* **Applied Optics**, 43 (7), p. 1570-1576, Mar. 2004.

KIM, Z. et. al. *Polarization compensation for a birefringent Fabry-Perot interferometer.* **Review of Scientific Instruments**, 75 (8), p. 2752-2755, Aug. 2004.

KINSMAN, B. E. AND HANNEY, R. *Preparation and purification of metal fluorides for crystals and glasses.* **Advanced Materials for Optics and Electronics**, 5, p. 109-115, October 1994.

KISHIMOTO, H. et. al. *Photocatalytic activity of titanium oxide prepared by liquid phase deposition (LPD).* **Journal of Materials Chemistry**, 8 (9), p. 2019-2024, 1998.

KOLTUN, M. M. **Solar cells, their optics and metrology**. Allerton Press, Inc., 1988.

KOZICK, RICHARD J. AND KASSAM, SALEEM A. *Synthetic aperture pulse-echo imaging with rectangular boundary arrays.* **IEEE Transactions on Image Processing**, 2 (1), January 1993.

KOZICK, RICHARD J. AND KASSAM, SALEEM A. *Linear imaging with sensor arrays on convex polygonal boundaries.* **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, 21 (5), September 1991.

KREBS, OLIVIER AND VOISIN PAUL *Giant optical anisotropy of semiconductor heterostructures with no common atom and the quantum-confined Pockels effect.* Phycical **Review Letters**, 77 (9), August 1996.

LALANNE, P.; MORRIS, G. M. *Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization.* **Journal of Optical Society of America A**, v. 13, n. 4, p. 779-784, Apr. 1996.

LAURA, E. K. et. al. *Spectropolarimetry of the luminous narrow-line Seyfert galaxies IRAS 20181-2244 and IRAS 13224-3809.* **The Astrophysical Journal**, v. 518, p. 219-255, Jun. 1999.

LEPRINCE-WANG, Y. et. al. *Correlation between microstructure and the optical properties of TiO_2 thin films prepared on different substrates.* **Thin Solid Films**, 307, p. 38-42, 1997.

YU-LUNG LO; HSIN-YI LAI AND WERN-CHENG WANG, *Developing stable optical fiber refractometers using PMDI with two-parallel Fabry-Perots*. **Sensor and Actuators B**. 62, p. 49-54, 2000.

MAGALHÃES, A. M. *Polarimetria astronômica*. **Proceedings Simpósio Internacional de Colaboração Científica**. São Paulo, 1997.

MAGALHÃES, A. M. et al. *High precision CCD imaging polarimetry*. **Polarimetry of the Interstellar Medium ASP Conference Series**. 97, p. 118-122, 1995.

MASUDA, K; et al. *Retrieval of aerosol optical properties over the ocean using multispectral polarization measurements from space*. **Applied Mathematics and Computation**, 116, p. 103-114, 2000.

MERGEL. D. *Modeling thin TiO_2 films of various densities as an effective optical médium*. **Thin Solid Films**, 397, p. 216-222, 2001.

MIGLIUOLO, M. AND SCHILESINGER, T. E. *Electro-optic thin films by magnetron Sputtering*. **Il Nuovo Cimento**, 20 D (N. 7-8), Agosto 1998.

MOHARAM, M. G.; GAYLORD, T. K. *Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings*. **Journal of Optical Society of America A**, v. 3, n. 11, p. 1780-1787, Nov. 1986.

MOSS, T. S.; BURRELL, G. J. AND ELLIS, B. **Semiconductor opto-electronics**, Butterworth & Co., 1973.

NADAV, S. et al. *Cuttlefish use polarization sensitivity in predation on silvery fish*. **Vision Research**, 40, p. 71-75, 1999.

TPF: Terrestrial Planet Finder. **Publication: 99-003**.

OHRING, M. **Materials science of thin films: Deposition and structure**. ed. Academic Press, 2nd. Edition, 2002.

OKUYA, M.; NAKADE, K. AND KANEKO, S. *Porous TiO_2 thin films synthesized by a spray pyrolysis deposition (SPD) technique and their application to dye-sensitized solar cells*. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 70, p. 425-435, 2002.

OPTICAL SOCIETY OF AMERICA **Handbook of Optics**. McGraw-Hill Book Company.

PANKOVE, Jacques I. **Optical process in semiconductors**. ed. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.

HASS, G; FRANCOMBE, M. H. AND HOFFMAN, R.W. *Metal-dielectric interference filters*. In: **Physics of thin films**. New York, ed. Academic Press, 1977, v. 9, p. 74-143.

REITZE, D. H., et. al. *Electro-optic properties of single crystalline ferroelectric thin films.* **Applied Physics Letters**, 63 (5), August 1993.

ROWE, M. P.; CORLESS, J. M.; ENGHETA, N AND PUGH, E. N. Jr. *Scaning interferometry of sunfish cones. I. Longitudinal variation in single-cone refractive index.* **Journal of Optical Society of America A**, 13 (11), November 1996.

ROWE, M. P.; PUGH, E. N.; TYO, J. S. AND ENGHETA, N. *Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media.* **Optics Letters**, 20 (6), March 1995.

SANDALPHON, B. K.; MEERHOLZ, K. AND PEYGHAMBARIAN, N. *Ellipsometric measurements of poling birefringence, the Pockels effect, and the Kerr effect in high-performance photorefractive polymer composites.* **Applied Optics**, 35 (14), May 1996.

SCHWARZ, M. et. al. *Single chip CMOS imagers and flexible microelectronic stimulators for a retina implant system.* **Sensors and Actuators A**, 83, p. 40-46, 2000.

SMITH, STEWART G. AND HURWITZ, E. D. et. al. *A single-chip CMOS 306 x 244-pixel NTSC video camera and a descendant coprocessor device.* **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 33 (12), December 1998.

SUNETRA K. M. et. al. *CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems.* **IEEE journal of solid-state circuits**, 32, (2), Feb. 1997.

SWANEPOEL, R. *Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films.* **Journal of Physics E: Scientific Instrumentation**, v. 17, p. 896-903, Feb. 1984.

SZE, S. M. **Semiconductor sensors**. New York, ed. John Wiley & Sons, 1994.

SZE, S. M. **VLSI Technology**, McGraw-Hill Book Company, Murray Hill, New Jersey, 1983.

SZE, S. M. **Physics of semiconductor devices**. New York, ed. John Wiley & Sons, 2ª. ed., 1981.

TANAKA, KATSUHISA; FUJITA, KOJI; SOGA, N. QIU J. AND HIRAO K. *Faraday effect of sodium borate glasses containing divalent europium ions.* **Journal of Applied Physics**, 82 (2), July 1997.

TENEV, TK. et. al. *Electrical and polarization controlled bistability and oscillations in photorefractive birefringent Fabry-Perot resonators.* **Optics Communications**, 231 (1-6), p. 417-429, Feb. 2004.

TERVO, J.; TURUNEN, J. *Transverse and longitudinal periodicities in fields produced by polarization gratings.* **Optics Communications**, 190, p. 51-57, Apr. 2001.

TERVO, J.; TURUNEN, J. *Paraxial-domain diffractive elements with 100% efficiency based on polarization gratings.* **Optics Letters**, v. 25, n. 11, p. 785-786, 2000.

THACHER, PHILIP D. *Optical effects of fringing fields in Kerr cells.* **IEEE Transactions on Electrical Insulator**, EI-11 (2), June 1976.

THELEN, A. *Design of multilayer interference filters.* In: **Physics of thin films**. New York, ed. Academic Press, 1969, 5 v, p. 47-85.

TURPIN, K et. al. *The influence of particle size in active polarization imaging in scattering media.* **Optics communications**, 168, p. 325-335, 1999.

TYO, J. S. *Enhancement of the point-spread function for imaging in scattering media by use of polarization-difference imaging.* **Journal of Optical Society of America A**. 17, (1), January 2000.

TYO, J. S.; PUGH, E. N. Jr. AND ENGHETA, N. *Colorimetric representation for use with polarization-difference imaging of objects in scattering media.* **Journal of Optical Society of America A**, 15 (2), February 1998.

TYO, J. S.; ROWE, M. P.; PUGH, E. N. AND ENGHETA, N. *Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging.* **Applied Optics**, 35 (11), April 1996.

ÜNLÜ, M. S.; EMNLEY, M. K. AND DOSUNMU, O. I. *High-speed Si resonant cavity enhanced photodetectors and arrays.* **Journal of Vacuum Science Technology**, A 22 (3), p. 781-787, May/June 2004.

USHENKO, A. G. *Correlation processing and wavelet analysis of polarization images of biological tissues.* **Optics and spectroscopy**, 91 (5), p. 773-778, June 2001.

VASÍCEK, A., **Optics of thin films**. New York, ed. North-Holland Publishing Co., 1960.

VAUGHAN, J. M. **The Fabry-Perot interferometer: History, theory, practice and applications**. ed. Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989.

VOLK, J.; et al. *Porous silicon multilayers for sensing by tunable IR-transmission filtering.* **Sensors and actuators B**, 100, p. 163-167, 2004.

VOLK, J.; et al. *The ideal vehicle for optical model development: porous silicon multilayers.* **Thin solid films**, 455-456, p. 535-539, 2004.

WEISS, STEFFEN; et al. *Novel polymeric materials, architectures and characterization techniques for electro-optics.* **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, 280, p. 257-270, 1996.

WOLFF, L. B. *Polarization vision: a new sensory approach to image understanding.* **Image and Vision Computing**, 15, p. 81-93, 1997.

WOLF, H. F. *Silicon semiconductor data.* Pergamon Press, 1969.

WU, JS; NI, WT AND CHEN, SJ. *Building a 3.5 m prototype interferometer for the Q&A vacuum birefringence experiment and high-precision ellipsometry.* **Classical and Quantum Gravity**, 21 (5), p. S1259-S1263, Mar. 2004.

WU, Q. AND HODGKINSON, I. J. *Materials for birefringent coatings.* **Applied Optics**, Suplement, December 1994.

XU, JIANJUN; ZHOU, LIGUI AND THAKUR, M. *Measurement of electro-optic effects in single crystal films of N-(4-nitrophenyl)-L-prolinol.* **Applied Physics Letters**, 69 (9), August 1996.

YATES, G. J.; SMITH, G. W.; ZAGARINO, P. AND THOMAS, M. C. *Measuring neutron fluences and gamma/X-Ray fluxes with CCD cameras.* **IEEE**

Transactions on Nuclear Science, 39 (5), p. 1217-1225, October 1992.

YI, D. et. al. *Broadband polarizing beam splitter based on the form, birefringence of a subwavelength grating in the quasi-static domain*. **Optics Letters**, 29 (7), p. 754-756, Apr. 2004.

YOUNG, MATT. **Óptica e lasers**. ed. EDUSP, 1998.

YU, W. J. et. al. *Synthesis of wave plates using multilayered subwavelength structure*. **Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters**, 43 (4A), p. L439-L441, Apr. 2004.

APÊNDICE I – Receitas de implementação dos filtros de interferência em ordem cronológica

No texto principal desta monografia foram citadas receitas para implementação de filtros não-polarizadores, de uma e duas cavidade, e também de filtros polarizadores (2 cavidades).

Devido aos problemas enfrentados com o equipamento de *Sputtering*, em termos de falta de reprodutibilidade de resultados, mesmo com a reprodução exata de uma dada receita, acabamos com apenas alguns filtros polarizadores funcionais, ainda que com características diferentes das projetadas.

Este apêndice traz, em ordem cronológica, as receitas que foram testadas com os comentários sobre os resultados obtidos. Vemos que ao final das experimentações, foram conseguidas melhores condições de reprodutibilidade, permitindo-nos um correto posicionamento do pico de transmitância máxima no comprimento de onda de projeto, apesar de não terem sido conseguidas características de polarização tão boas quanto as obtidas na primeira corrida de filtros polarizadores.

Passemos às receitas.

➔ Receita 01 (não-polarizador): Filtros FA01 a FA12 (26/06/2003)

Material ⇒	**Ag**	**TiO_2**			**Ag**	**TiO_2**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	10	5'10"	15	15	11	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400		1600		800		1640		400

Essa primeira receita ainda é incapaz de produzir filtros birrefringentes pois ambas as camadas de TiO_2 (cavidades de ressonância) foram implementadas sob o mesmo ângulo, sendo ambas assim somente de material P ou S. Trata-se pois, apenas de uma tentativa para verificar a validade da receita em termos de espessuras. Os

filtros assim obtidos devem ser capazes de filtrar a luz em termos de comprimento de onda apenas.

➔ Receita 02 (polarizador, funcional): Filtros FB01 a FB12 (22/07/2003)

Ti — Rotação 90° — Ti

Material ⇒	**Ag**		**TiO_2**		**Ag**		**TiO_2**		**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	10	4'40"	15	15	11	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400		1600		800		1640		400

Essa segunda receita apresenta algumas alterações com relação à primeira quais sejam, a rotação de 90° exercida sobre a lâmina (veja figura 142) entre a deposição da primeira e da segunda camadas de TiO_2 e a deposição de uma fina camada de Ti metálico (*flash* de Ti) sobre as duas primeiras camadas de Ag. A primeira medida tem por objetivo fazer com que essas camadas apresentem índices de refração diferentes para polarizações diferentes na luz que incide no filtro, e conseqüentemente fará com que o mesmo apresente a capacidade de filtrar a luz também em estado de polarização. Já a segunda medida pretende prover uma barreira que impeça que o filme de Ag se oxide no ambiente de O_2 necessário para a deposição de TiO_2.

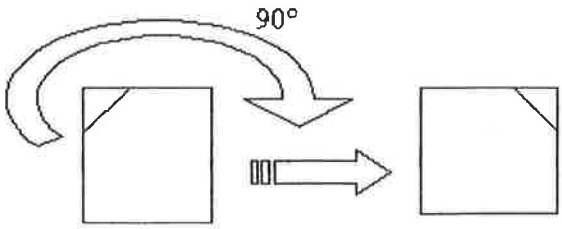


Fig. 142: Rotação das lamínulas de vidro entre as deposições de TiO_2.

Também podemos notar que o tempo para a obtenção da camada de Ag intermediária foi reduzido em relação ao tempo praticado na primeira receita. Isso se

deve a uma tentativa para aumentar a transmitância do filtro, pois constatamos que o mesmo apresentava um rendimento muito inferior ao projetado, como veremos mais à frente.

➔ Receita 03 (polarizador, não-funcional): Filtros FC01 a FC06 (22/07/2003)

Rotação 90°

Material ⇒	**Ag**		**TiO_2**		**Ag**		**TiO_2**		**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	10	4'40"	15	15	11	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400		1600		800		1640		400

Com relação à receita anterior, a receita 03 não prevê mais o *flash* de Ti pois, as simulações RBS mostraram que o efeito de oxidação da Ag é inexistente ou muito pequeno. Já a rotação é fundamental para que o comportamento do filtro resultante seja polarizador, e por isso ela é, aqui como doravante, mantida.

O valor de tempo praticado para a camada intermediária de Ag também foi mantido.

➔ Receita 04 (polarizador, não-funcional): Filtros FC06 a FC12 (02/09/2003)

Rotação 90°

Material ⇒	**Ag**		**TiO_2**		**Ag**		**TiO_2**		**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	10	3'50"	15	15	11	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400		1600		600		1640		400

A diferença entre as receitas 03 e 04 é apenas o tempo para a obtenção da camada intermediária de Ag. Aqui fizemos uma tentativa de aumentar a

transmitância máxima do filtro diminuindo a quantidade de metal empregada, ou seja, reduzindo a camada de Ag de 800 para 600 Å. Os resultados poderão ser vistos nas secções seguintes.

➔ Receita 05 (polarizador, não-funcional): Filtros FD01 a FD06 (17/09/2003)

Rotação 90°

Material ⇒	**Ag**		**TiO_2**		**Ag**		**TiO_2**		**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	7'30"	4'40"	15	15	9'50"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400		1600		800		1640		400

Nesta quinta receita, alteramos novamente o tempo para a obtenção da camada intermediária de Ag de volta para os valores praticados na receita 03, ou seja, depositando novamente 800 Å. Isso foi tentado como uma medida para diminuir o número de variáveis entre um teste e outro, já que constatamos que os filtros implementados após a segunda receita sempre foram inferiores àquela corrida.

Alteramos então os valores dos tempos para a obtenção de ambas as camadas de TiO_2, ou seja, das cavidades de ressonância. O valor da espessura nominal não foi alterado pois esperamos que tais modificações reflitam de fato esses valores, já que as medidas por RBS mostraram que tais camadas aparentavam ser mais espessas do que o esperado.

Até esse ponto, as receitas implementadas representaram tentativas de se conseguir o resultado projetado a partir de modificações da receita original, a segunda.

As sexta e sétima receitas seguintes representam uma retomada da receita original, com apenas algumas diferenças quais sejam o aumento do tempo de *pré-Sputtering* da Ag, visando diminuir o grau de impurezas na superfície do alvo antes de proceder-se à deposição propriamente.

➔ Receita 06 (polarizador, não-funcional): Filtros FE01 a FE04 (17/09/2003)

Rotação 90°

Material ⇒	**Ag**	**TiO_2**			**Ag**	**TiO_2**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	10	4'40"	15	15	11	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$
Espess. Nom. [Å]	400	1600			800	1640			400

Além disso, a sétima receita aumenta de 1 para 2 minutos a diferença entre os tempos de deposição das duas cavidades. Esperava-se com isso aumentar a separação entre as componentes *p* e *s* da luz transmitida.

➔ Receita 07 (polarizador, pequeno efeito): Filtros FF01 a FF04 (17/09/2003)

Rotação 90°

Material ⇒	**Ag**	**TiO_2**			**Ag**	**TiO_2**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15	15	9'30"	4'40"	15	15	11'30"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400	1600			800	1640			400

➔ Receita 08 (polarizador, não-funcional): Filtros FG01 a FG04 (19/07/2004)

Rotação 90°

Material ⇒	**Ag**	**TiO_2**		**Ag**	**TiO_2**		**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15'	9'20"	4'40"	15'	10'	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	—	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	—	$4x10^{-4}$	$4x10^{-4}$	—
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1x10^{-3}$	$1x10^{-3}$	$1x10^{-3}$	$1x10^{-3}$	$1x10^{-3}$	$1x10^{-3}$	$1x10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400	1040		720	1070		400

Antes das receitas 06 e 07 serem implementadas, e devido às dificuldades em obtermos resultados reprodutíveis com as receitas 03 a 05, foram feitos alguns testes com filtros de apenas uma cavidade, ou seja, filtros obtidos depositando-se sucessivamente um filme de Ag sobre o substrato de vidro, seguido de um filme de TiO_2 e depois por outro de Ag.

Finalmente, na receita 08, procuramos obter novamente um filtro com pico de máxima transmitância centrado em torno dos 700 nm, como o conseguido nas primeiras receitas. Só que neste caso, ao contrário dos anteriores, o correto posicionamento desse pico ocorreu para valores menores de tempo de deposição, demonstrando que agora temos um maior controle sobre o processo de deposição por *Sputtering* e já temos refinamento suficiente para ajustar a espessura desejada.

Além desses filtros polarizadores, foi necessário implementar também filtros de uma única cavidade.

Apesar da deposição em ângulo, filtros de uma única cavidade não são capazes de atenuar preferencialmente nenhuma componente de polarização da luz. Não são filtros polarizadores.

Nosso objetivo ao incluí-los aqui foi apenas o de facilitar a tarefa de caracterização, através de simulações por Matlab® já que agora teríamos menos variáveis para tentarmos ajustar aos parâmetros observados, e a partir daí tentarmos extrapolar os dados para verificarmos quais alterações seriam necessárias para conseguirmos filtros melhores com duas cavidades.

Empregamos duas receitas para implementar os filtros de uma cavidade. A primeira delas PA é a que se segue.

➔ Receita PA (uma cavidade, espessura menor): Filtros PA01 a PA06 (10/11/2003)

Material ⇒	**Ag**	**TiO_2**	**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15'42"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400	670	800

A receita PA foi projetada para que o pico de transmitância máxima se localizasse em ~500 nm. Apesar de o valor do comprimento de onda para máxima transmitância ser o mesmo das outras receita, estamos implementando aqui uma cavidade muito mais estreita e, justamente por isso, o filtro resultante não deverá apresentar aqueles picos espúrios na região do azul/violeta.

Os filtros iniciais não foram projetados para espessuras tão finas pois os dados relativos à birrefringência de filmes de espessura pequena não puderam ser levantados, dada a limitação do processo de medida dos mesmos, mas os dados colhidos nos levam a crer que a birrefringência para essas espessuras é muito pequena.

Experimentamos também com a receita PA2 que é apresentada a seguir.

Nosso objetivo ao implementar essa receita foi o de tentar levantar dados, através de simulação, sobre a espessura de 1600 Å, já bastante utilizada em outras receitas. O tempo empregado nessa receita segue o que fora determinado na receita 05.

➔ Receita PA2 (uma cavidade, espessura maior): Filtros PA07 a PA12 (12/11/2003)

Material ⇒	**Ag**	**TiO_2**			**Ag**
Sputtering [min]	2'35"	15'	15'	7'30"	2'35"
Pressão O_2 [mBar]	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Pressão Ar + O_2 [mBar]	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Espess. nom. [Å]	400		1600		800

Os resultados da caracterização destes filtros podem ser encontrados no Anexo III.

APÊNDICE II – Absorção da luz em semicondutores

O estudo da absorção de ondas eletromagnéticas pode ser levado a efeito quer considerando-se apenas o átomo isoladamente, como num gás por exemplo, quer num sólido, onde teremos a participação dos elétrons das camadas de valência e de condução.

De uma forma ou de outra a absorção se dá sempre que a energia do fóton incidente for suficiente para levar um elétron de um nível inicial de energia a um nível final conservando-se nesse processo tanto a energia total do sistema quanto o seu momento (Pankove, 1971).

Num semicondutor, há vários mecanismos pelos quais quântuns de energia das ondas eletromagnéticas incidentes são absorvidos.

Nas próximas secções apresentaremos alguns desses mecanismos.

Ap.2.1 – Coeficiente de absorção α

O coeficiente de absorção de um material é uma grandeza que representa, fisicamente, a somatória dos efeitos de cada processo de absorção que ocorre para o referido material.

O seu comportamento global é começar abruptamente em um nível de energia que é função do *gap* do material e a partir daí crescer até atingir o seu valor máximo, como pode ser visto na figura 143.

A unidade de α é cm^{-1}, ou seja, o inverso da unidade de distância. Isso quer dizer que ele contabiliza a profundidade, dentro do material, que a luz incidente deve percorrer para que sua intensidade diminua para $1/e$ do valor inicial.

Assim, quanto maior o valor de α, mais superficialmente se dará a absorção da luz, ao passo que para valores menores, é necessário um maior volume dentro do semicondutor para que se dê a absorção de uma parcela significativa da radiação incidente (Sze, 1981).

A figura 144 ilustra o que foi dito acima.

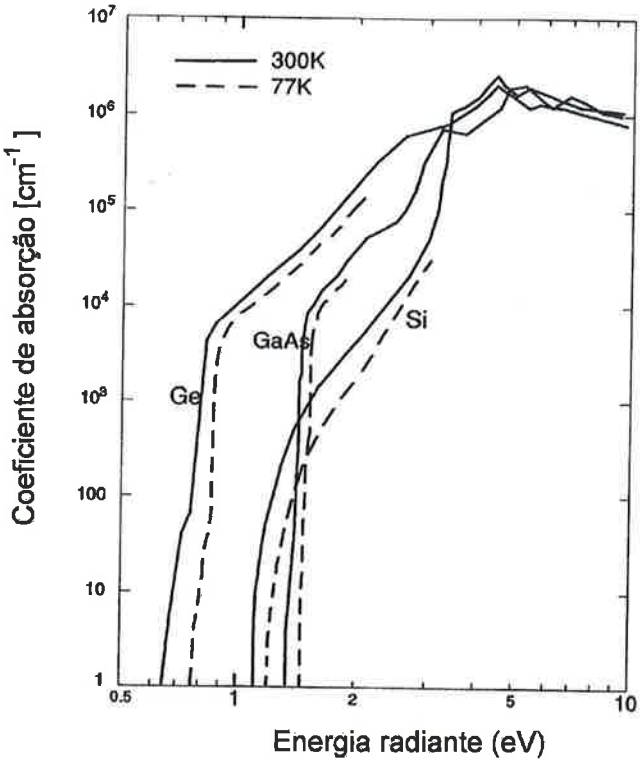


Fig. 143: Coeficiente de absorção para o Ge, Si e GaAs.

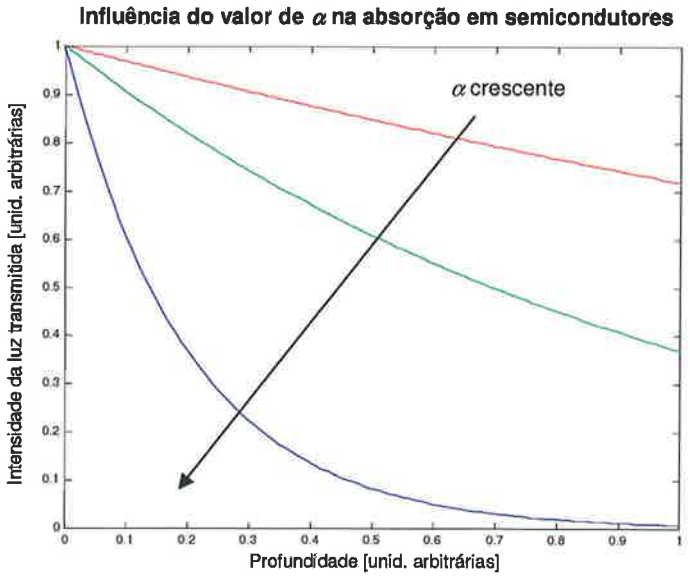


Fig. 144: Queda na intensidade da luz devida à absorção em semicondutores.

A tabela 35 mostra o valor de α para alguns comprimentos de onda distribuídos ao longo do espectro desde a região do visível até o ultravioleta próximo.

Tab. 34: Coeficientes de absorção para o Si (Jellison et al, 1982).

λ [nm]	α [cm^{-1}]	E [eV]	Cor
694	$2{,}705 \cdot 10^3$	1,7865	vermelho
633	$4{,}070 \cdot 10^3$	1,9587	vermelho
532	$1{,}0086 \cdot 10^4$	2,3305	verde
514	$1{,}2556 \cdot 10^4$	2,4121	verde
488	$1{,}7992 \cdot 10^4$	2,5407	Azul
485	$1{,}8585 \cdot 10^4$	2,5564	Azul
458	$2{,}9179 \cdot 10^4$	2,7071	Azul
405	$1{,}1255 \cdot 10^5$	3,0613	Violeta
355	$1{,}0531 \cdot 10^6$	3,4925	U.V. próx.
337	$1{,}1435 \cdot 10^6$	3,6791	U.V. próx.
308	$1{,}5247 \cdot 10^6$	4,0255	U.V. próx.

Ap.2.2 – Absorção da luz em junções PN

Até agora viemos tratando dos fenômenos de absorção da luz em materiais semicondutores puros.

Se, no entanto, implementarmos uma junção entre dois semicondutores dopados como tipos P e N respectivamente, teremos um diodo que é a base de um sensor de luz.

Para tanto devemos considerar que em regime de quase-equilíbrio, temos três regiões de interesse numa junção PN, conforme vemos na figura 145.

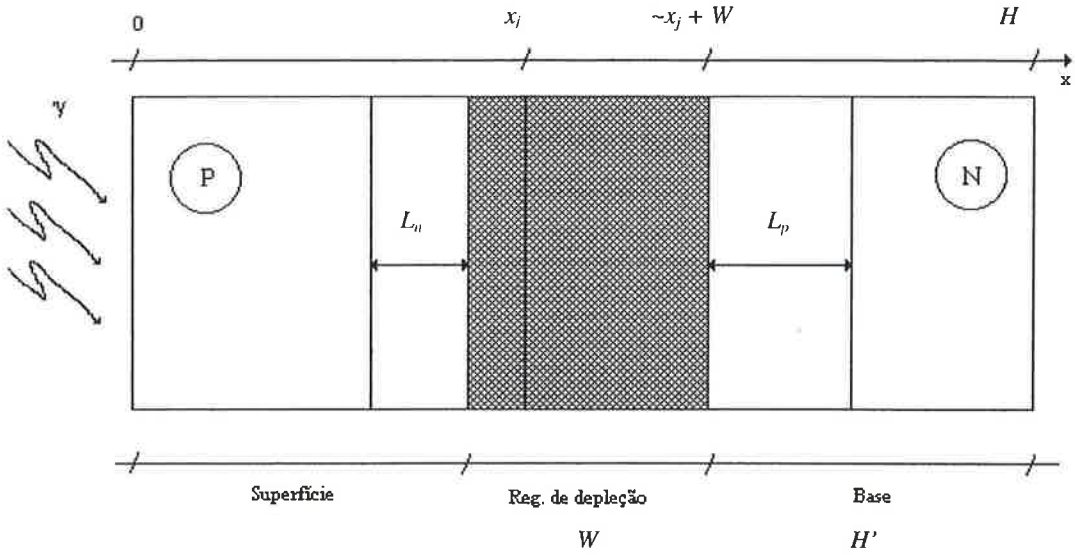


Fig. 145: Junção PN sob iluminação.

Tais regiões são a região de depleção, caracterizada pela profundidade de junção e por sua largura W, e as regiões quase-neutras de superfície e de base.

Tais regiões são as únicas que fornecem portadores foto-gerados para a corrente total que atravessa o dispositivo.

Na região de depleção, todo fóton absorvido gerará um par elétron-lacuna que será separado devido ao forte campo elétrico local, compondo assim uma parcela da corrente total.

As regiões quase-neutras de base e superfície são definidas como sendo o volume de semicondutor onde os portadores minoritários gerados têm tempo suficiente para se difundir em direção à borda da região de depleção antes de se recombinarem. Se ocorrer tal difusão, o campo elétrico da região de depleção acelerará os portadores para o outro lado da junção, onde não são mais minoritários, e desse modo acabarão por fazer parte da corrente total.

Para efetuarmos os cálculos da corrente total que atravessa uma junção PN sob iluminação, devemos partir das equações básicas encontradas em (Sze, 1981):

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot [1 - R(\lambda)] \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x} \qquad \text{(Ap.3.2-1)}$$

onde, α é o coeficiente de absorção, F é o fluxo de fótons incidentes, R é a Reflectância (parcela refletida) e x é a profundidade dentro do semicondutor.

Para uma taxa de geração como a da equação Ap.3.2-1, as equações de continuidade de estado estacionário para elétrons e lacunas, em uma dimensão, seriam dadas por (Sze, 1981):

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} = 0 \qquad \text{(Ap.3.2-2a)}$$

$$G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_p}{\partial x} = 0 \qquad \text{(Ap.3.2-2b)}$$

sendo as equações de corrente para elétrons e lacunas respectivamente:

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n_p \cdot E + q \cdot D_n \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} \qquad \text{(Ap.3.2-3a)}$$

$$J_p = q \cdot \mu_p \cdot p_n \cdot E - q \cdot D_p \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x} \qquad \text{(Ap.3.2-3b)}$$

Para lacunas na região quase-neutra do lado N, substituindo Ap.3.2-3b e Ap.3.2-1 em Ap.3.2-2b e desprezando a componente de corrente devida ao campo elétrico, temos:

$$D_p \cdot \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + \alpha \cdot F \cdot (1 - R) \cdot e^{-\alpha \cdot x} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \qquad \text{(Ap.3.2-4)}$$

a solução geral para a equação diferencial Ap.3.2-4 acima tem o seguinte formato (Sze, 1981):

$$p_n - p_{n0} = A \cdot \cosh(x / L_p) + B \cdot sinh(x / L_p) - \frac{\alpha \cdot F \cdot (1 - R) \cdot \tau_p}{\alpha^2 \cdot L_p^2 - 1} \cdot e^{-\alpha \cdot x} \qquad \text{(Ap.3.2-5)}$$

onde A e B são constantes a serem determinadas pelas condições de contorno e $L_p = (D_p \cdot \tau_p)^{1/2}$.

As condições de contorno (para a equação Ap.3.2-5) são as seguintes:

a) na superfície do material temos recombinação de portadores a uma velocidade S_p:

$$D_p \cdot \frac{\partial(p_n - p_{n0})}{\partial x} = S_p \cdot (p_n - p_{n0}) \qquad \text{(Ap.3.2-6)}$$

b) na extremidade da região quase-neutra, devemos ter um excesso de portadores aproximadamente nulo:

$$p_n - p_{n0} \cong 0 \qquad \text{(Ap.3.2-7)}$$

Usando essas condições de contorno, chegamos finalmente à equação de corrente devida a lacunas na região próxima da superfície (tipo P na figura 145):

$$J_{sup} = J_p = \left[\frac{q \cdot F \cdot (1-R) \cdot \alpha \cdot L_p}{\alpha^2 \cdot L_p^2 - 1}\right] \cdot \left[\frac{\left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} + \alpha \cdot L_p\right) - e^{-\alpha \cdot x_j} \cdot \left(\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p}\right)}{\frac{S_p \cdot L_p}{D_p} \cdot \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p}} - \alpha \cdot L_p \cdot e^{-\alpha \cdot x_j}\right] \qquad \text{(Ap.3.2-8)}$$

analogamente, para os elétrons na base (tipo N na figura 145) temos:

$$J_{base} = J_n = \left[\frac{q \cdot F \cdot (1-R) \cdot \alpha \cdot L_n}{\alpha^2 \cdot L_n^2 - 1}\right] \cdot e^{-\alpha(x_j + W)} \cdot \left[\alpha \cdot L_n - \frac{\left(\frac{S_n \cdot L_n}{D_n}\right) \cdot \left[\cosh\frac{H'}{L_n} - e^{-\alpha \cdot H'}\right] + \sinh\frac{H'}{L_n} + \alpha \cdot L_n \cdot e^{-\alpha \cdot H'}}{\frac{S_n \cdot L_n}{D_n} \cdot \sinh\frac{H'}{L_n} + \cosh\frac{H'}{L_n}}\right] \qquad \text{(Ap.3.2-9)}$$

onde os parâmetros x_j, L_p, H', W e L_n estão indicados na figura 145.

Já para a região de depleção, a equação de corrente fica:

$$J_{dp} = q \cdot F \cdot (1-R) \cdot e^{-\alpha \cdot x_j} \cdot \left[1 - e^{-\alpha \cdot W}\right] \qquad \text{(Ap.3.2-10)}$$

A corrente total na junção será a soma de três parcelas, ou seja:

$$J_T = J_{sup} + J_{base} + J_{dp} \qquad \text{(Ap.3.2-11)}$$

O rendimento, ou resposta espectral, *RE*, desse dispositivo é, por definição, a corrente total gerada opticamente dividida pelo fluxo transmitido de fótons e pela carga do elétron, ou seja:

$$RE = \frac{J_T}{q \cdot F \cdot (1 - R)} \qquad \text{(Ap.3.2-12)}$$

A partir da equação Ap.3.2-12, e dos valores de α da tabela 35, podemos calcular a *RE* para uma junção como a vista na figura 146.

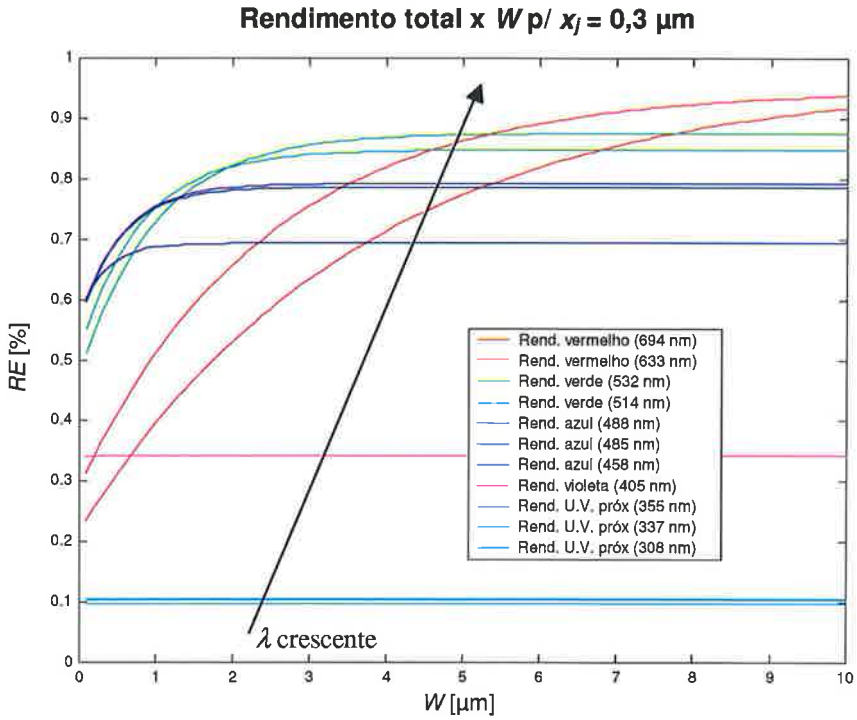


Fig. 146: *RE* para uma junção de x_j = 0,3 µm.

Pela figura 146 podemos dizer que quanto maior o coeficiente α (λ decrescente), menor o *RE* associado a esse comprimento de onda. Por outro lado, se olharmos a figura 147, veremos que não ocorre absorção, para o Si, para

comprimentos de onda maiores do que 1.127,1 nm, comprimento esse[7] que se encontra na região do infravermelho próximo.

Em função disso, podemos dizer que há uma "janela de absorção" que, no caso do Si, vai do infravermelho próximo até o ultravioleta próximo. Fora dessa janela, não há geração de portadores (ou ela é pequena) devida à incidência da luz, e conseqüentemente, não é possível a detecção desse particular comprimento de onda.

A figura 147 a seguir ilustra o comportamento do rendimento de absorção para uma junção PN em silício, onde $x_j = 0{,}2$ μm, $W = 1{,}5$ μm e $W = 4{,}0$ μm.

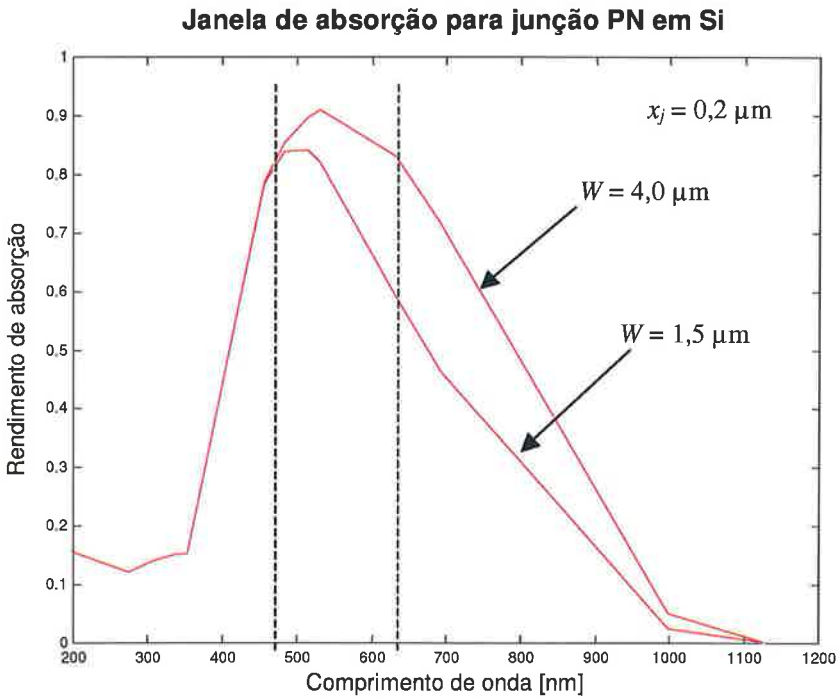


Fig. 147: Janela de absorção para uma junção PN em silício para dois valores de *W*.

O gráfico da figura 147 acima mostra que o rendimento máximo de absorção para o Si encontra-se na região do verde, daí ser uma boa escolha a implementação de um filtro para 550 nm.

O valor da largura da região de depleção (e logo o valor da absorção máxima e da largura da janela), pode ser controlado, por exemplo, através da dopagem de

[7] Valor calculado a partir da energia do *gap* do Si, que é de 1,1 eV.

substrato. As condições exibidas na figura 147 são para dopagens de $3 \cdot 10^{13}$ ($W = 4{,}0$ μm) e $2 \cdot 10^{14}$ ($W = 1{,}5$ μm) aproximadamente.

Também fica claro, ao observarmos a figura 147 que a absorção para comprimentos de onda menores não varia em função de W ficando assim saturada, já que é para esses valores de comprimento de onda que o silício apresenta os maiores coeficientes de absorção (vide tabela 35). Já o mesmo não acontece para comprimentos de onda maiores que dependem do valor de W, que representa um maior volume disponível para absorção.

Para a figura 148 a seguir, vemos que o comportamento apresentado no gráfico anterior se inverte, ou seja, para um dado W (1,5 μm por exemplo), o rendimento de absorção para comprimentos de onda menores varia com o valor de x_j.

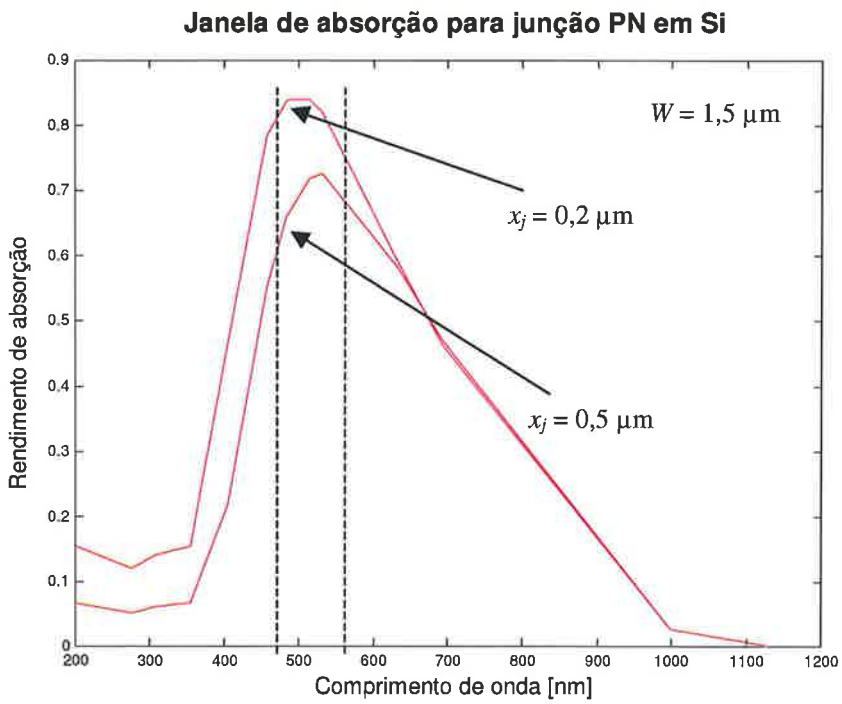


Fig. 148: Janela de absorção para junção PN em Si para dois valores de x_j.

Para ambas as situações, mostradas nas figuras 147 e 148 respectivamente, o que não varia é o fato do rendimento máximo de absorção ficar localizado em torno da região do verde.

APÊNDICE III – Procedimento para o projeto dos filtros e listagens dos *m-files*

Os filtros de interferência projetados neste trabalho tiveram seus parâmetros (espessuras das camadas de TiO_x) calculados com o uso de arquivos de *script*, *m-files*, disponíveis através da compra do livro de Hodgkinson e Wu (1997) e que são executados no *software* Matlab™ R12.

A primeira listagem, List. 1, ilustra o cálculo da transmitância/reflectância para um filtro Fabry-Perot de dupla cavidade. A utilização deste *script* é simples: utilizando-se os índices de refração previamente determinados na etapa de caracterização dos filmes de TiO_x, escolhemos espessuras para as camadas de ressonância e observamos o resultado através do gráfico da transmitância para esse filtro. Se o resultado não for adequado, basta variar-se as espessuras e verificar novamente o gráfico.

List. 1: *m-file* para o cálculo da transmitância de um filtro Fabry-Perot de duas cavidades.

```
function fperot2mdm(dp, ds, fig)

% Calculo do filtro 2mdm

Lamb0 = 550; %670; %800;
k = 1;

Lamb = [350:2:850];

d1 = 40;            % espessura da camada de Ag
d2 = 40.2;          % espessura da camada inter. De Ag

x = [458, 550, 633];       % comprimentos de onda

% p/ espessura de ~1650
y1 = [2.39269, 2.37310, 2.35604];  % índices de refração
y2 = [2.41269, 2.39310, 2.37604];

p1 = polyfit( x, y1, 2);     % função p/ interpolar os
p2 = polyfit( x, y2, 2);     % índ. de refração

TM = 0;             % impondo Ag como metal do filtro
```

```
for i = 1 : length( Lamb )

    if( TM == 0 )     % calcula índs. de refr. da Ag
        nS = silver( Lamb(i) ); % p/ cada compr. de onda
    end

    if( TM == 1 )
        nS = indAl( Lamb(i) );
    end

    if( TM == 2 )
        nS = gold( Lamb(i) );
    end

    if( TM == 3 )
        nS = indTi( Lamb(i) );
    end

    np = polyval( p1, Lamb(i) ); % calcula np e ns p/
    ns = polyval( p2, Lamb(i) ); % cada compr. de onda

% definição das camadas que compõem o filtro

    A1 = [nS nS d1/Lamb(i)]; % camada Ag
    A2 = [nS nS d2/Lamb(i)]; % camada Ag

    C1 = [ns np k*ds/Lamb(i)]; % camada de material P
    C2 = [np ns k*dp/Lamb(i)]; % camada de material S
    M1 = cmat( [A1; C1; A2] ); % gera matriz do material
                               % da 1ª camada ressonante
    M2 = cmat( [A2; C2; A1] ); % gera matriz do material
                               % da 2ª camada ressonante
    M = M1*M2;  % gera matriz da estrutura de 2 cavs.
    R = reflect( 1, M, 1.5 );  % cálculo da refletância
            % p/ incidência pelo ar e subst. de vidro
    Rp(i) = R(1,1);    % Reflectância p
    Rs(i) = R(2,2);    % Reflectância s
    Tp(i) = R(1,3);    % Transmitância p
    Ts(i) = R(2,4);    % Transmitância s
end

figure(fig)
plot( Lamb, Tp, 'green' )  % plota Transmit. p
hold on
plot( Lamb, Ts, 'blue' )   % plota Transmit. s
title( 'Transmitância para FP2m' )
xlabel('Comprimento de onda [nm]')
ylabel('Transmitância [%]')
legend( 'Tp', 'Ts' )
```

O uso do *script* listado em List. 1 é simples mas não muito prático. Consome-se muito tempo variando as espessuras e verificando-se o gráfico, mesmo com bons chutes iniciais.

Visando-se automatizar um pouco mais esse processo, elaboramos o *script* listado em List. 2. Aqui, basicamente, fornecemos uma espessura inicial para cada uma das camadas de TiO_2 e um passo para a sua variação. O *script* então chama recorrentemente o primeiro *script* e vai gerando gráficos para cada situação. Escolhe-se então o melhor candidato e faz-se nova corrida com um passo 10 vezes menor. Na primeira vez utiliza-se passos de 10 nm e na segunda, 1 nm. Menos do que isso o equipamento de *Sputtering* não tem precisão suficiente.

List. 2: Automatização no processo de utilização do *script* listado em List. 1.

```
% Varia a espessura das camadas S e P num filtro FP2m
function bestFP2m( Lini, passo )

for i = 0 : 12

    i+1
    LS = Lini + i * passo
    LP = Lini + i * passo

    FPerot2mdm( LS, LP, i+1 ) % chama repetidamente a
                              % fç Fperot2mdm descrita
                              % em List. 1
end
```

Esse foi o procedimento utilizado no projeto dos filtros de interferência implementados neste trabalho.

Ap.3.1 – Resumo do formalismo matemático empregado nos *toolbox* Matlab™

Os procedimentos descritos acima, como já mencionado, empregaram os *toolbox* fornecidos quando da compra do livro de Hodgkinson e Wu (1997). Tais *toolbox* são ferramentas de cálculo desenhadas para expandir os conceitos clássicos

de propagação de ondas eletromagnéticas para o caso onde o meio de propagação é birrefringente.

Para se conseguir isso, admite-se a existência de um índice de refração diferente para cada uma das 3 direções de propagação nesse meio, n_a, n_b e n_c. O efeito imediato da imposição dessa condição de contorno é que as equações de Maxwell passam a apresentar caráter tensorial, ou seja, ao invés de valores escalares, empregam-se matrizes para representar os valores de grandezas que dependam da direção de propagação.

Assim, ε passa a ser representado em forma matricial como se segue:

$$\hat{\varepsilon}_{123} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 = n_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 = n_b^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 = n_c^2 \end{bmatrix} \qquad \text{Ap.3.1-1}$$

Como é admitido meio não-magnético, μ reduz-se à matriz identidade.

Também as condições de contorno variam um pouco com relação à propagação em meio isotrópico. Naquele caso, os vetores campo elétrico e deslocamento elétrico são paralelos e ambos perpendiculares à direção de propagação. Já para a propagação em meios anisotrópicos, como ε não é mais um escalar, tal condição não mais se verifica obrigatoriamente e, no caso geral, temos:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \hat{\varepsilon}_{abc} \cdot \vec{E} \qquad \text{Ap.3.1-2}$$

assim, $\vec{E}$ não é necessariamente paralelo a $\vec{D}$ e nem perpendicular à direção de propagação $\vec{k}$.

Portanto, das equações de Maxwell para meio não-magnético, não-condutor e eletricamente anisotrópico temos:

$$\vec{k} \wedge \vec{E} = \mu_0 \cdot \omega \cdot \vec{H} \qquad \text{Ap.3.1-3}$$

$$\vec{k} \wedge \vec{H} = -\varepsilon_0 \cdot \hat{\varepsilon}_{abc} \cdot \omega \cdot \vec{E} \qquad \text{Ap.3.1-4}$$

$$\vec{k} \cdot \vec{D} = 0 \qquad \text{Ap.3.1-5}$$

$$\vec{k} \cdot \vec{H} = 0 \qquad \text{Ap.3.1-6}$$

A partir dessas equações e condições de contorno, na referência supracitada (veja capítulo 2) é desenvolvido todo um formalismo matemático para o tratamento do problema da propagação de ondas eletromagnéticas em meios birrefringentes.

Tal formalismo é depois empregado no cálculo das propriedades de reflectância, transmitância e absorbância dos filmes finos simulados. Para tanto é empregada a notação matricial onde um filme é definido por seus índices de refração (nas coordenadas principais do material, 1, 2 e 3, como definido na figura 8 do capítulo 2, ou para a incidência normal da luz, caso no qual teremos apenas os índices para polarização p e s, ou seja, n_p e n_S) e por sua espessura, expressa em função do comprimento de onda de projeto. A notação para isso já foi descrita no capítulo 4.

Nessa notação, estruturas podem ser definidas pelo empilhamento de vários filmes, bastando para isso, multiplicar as matrizes representativas de cada filme para se obter a matriz da estrutura completa.

As considerações apresentadas nesta secção não precisam ser levadas em conta quando do projeto dos filtros de interferência, bastando para isso empregar as funções do *toolbox* como "caixas-pretas" conforme o roteiro descrito na parte inicial deste apêndice (veja listagem 1 comentada).

APÊNDICE IV – Utilização do *software* SIMNRA®

Foi mencionado no capítulo 7, que para as análises RBS empreendidas neste trabalho, foi utilizado o *software* SIMNRA®, e não o RUMP, devido à capacidade daquele de realizar simulações fiéis mesmo na presença de ressonâncias nucleares (aumento do pico de um dado elemento devido a reações envolvendo os núcleos de átomos daquele elemento e as partículas alfa empregadas na análise), devidas à alta energia de feixe empregada para promover-se uma melhor separação entre os picos.

A utilização deste é *software* é bastante simples. Na sua versão 5.0 ele é capaz de ler diretamente de um arquivo .rbs gerado durante as análises e próprio para o RUMP. Na versão 4.4, aqui empregada, basta que entremos manualmente com os parâmetros como energia de feixe, ângulos, parâmetros de calibração, etc, no menu "*Setup*", que o *software* estará pronto para o início das simulações. Veja figura 149.

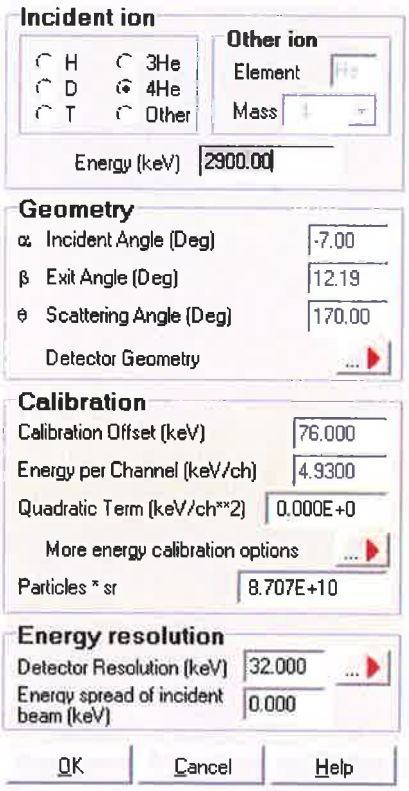


Fig. 149: Parâmetros da análises RBS utilizados no SIMNRA®.

Após a entrada dos parâmetros da análise, devemos esboçar a estrutura a ser simulada: número de camadas, espessuras (concentração planar na verdade, em $1 \cdot 10^{15}$ At/cm^2) e composição das mesmas. Para a especificação da composição de uma dada camada, devemos listar seus elementos constituintes e a porcentagem em que aparecem. A figura 150 ilustra a composição e espessura para a segunda camada de uma simulação de filtro de interferência sobre substrato de vidro. A estrutura simulada é uma pilha de três camadas de Ag intercaladas por duas de TiO_x. Abaixo da janela com os dados da segunda destas camadas aparece o espectro simulado sobreposto ao obtido experimentalmente.

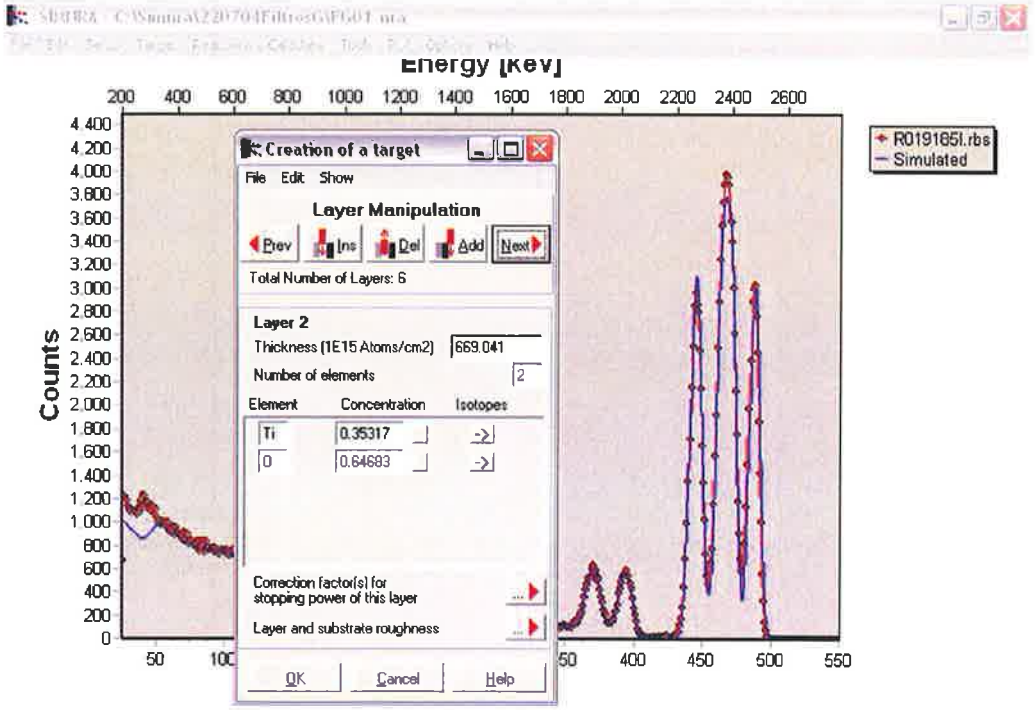


Fig. 150: Dados para a simulação de um filtro de interferência sobre vidro. Ao fundo, espectros simulado e experimental.

Devido ao problema de ressonância, já mencionado, antes da simulação propriamente dita, devemos escolher, para cada um dos elementos presentes na amostra a ser simulada (incluindo aqueles presentes no substrato de vidro), as tabelas adequadas em termos de energia de feixe, ângulo de incidência e o isótopo mais

abundante do elemento simulado. Isso pode ser ajustado através do menu "*Reactions*" visível na janela de fundo na figura 150.

Finalmente, basta iniciar a simulação pelo menu "*Calculate*", definindo a região a ter o espectro ajustado, o número de iterações, o erro máximo e o(s) parâmetro(s) a serem variados: energia de calibração, partículas e ângulo sólido do detector, espessura, rugosidade e composição da camada. Veja figura 151.

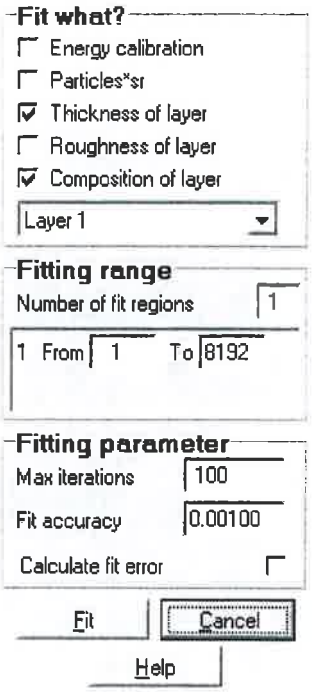


Fig. 151: Parâmetros para a simulação do espectro RBS.

Uma vez que convirja a simulação, os parâmetros simulados (espessura e composição da camada, no presente trabalho) são alterados pelo *software* e podem ser visualizados na janela onde foram definidos. Para o presente caso, na janela vista na figura 150.

A estequiometria, definida neste trabalho como a relação entre a porcentagem de O e a de Ti no filme, é obtida diretamente da divisão dos valores porcentuais vistos na janela da figura 150. Já a espessura pode ser convertida de At/cm^2 para ângstrons ou nm pela reta de calibração (capítulo 7) ou utilizada como é fornecida pelo SIMNRA®, quando então aparece como concentração planar nos gráficos.