UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ANDRÉ LUIS MARTINS

Sistema de monitoramento óptico banda larga direto
para fabricação de filmes finos multicamadas com
sincronização *sensorless*

São Carlos

2011

ANDRÉ LUIS MARTINS

Sistema de monitoramento óptico banda larga direto para fabricação de filmes finos multicamadas com sincronização *sensorless*

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Processamento de Sinais e
Instrumentação

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis
Linhari Rodrigues

São Carlos

2011

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M386s Martins, André Luis
 Sistema de monitoramento óptico banda larga direto
para fabricação de filmes finos multicamadas com
sincronização *sensorless* / André Luis Martins ;
orientador Evandro Luis Linhari Rodrigues. -- São Carlos,
2011.

 Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. Área de Concentração em
Processamento de Sinais e Instrumentação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2011.

 1. Processamento de sinais ópticos. 2. Monitor óptico
banda larga. 3. Filtros ópticos multicamadas.
4. Espectrofotômetro. 5. Filmes finos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro ANDRÉ LUÍS MARTINS.

Dissertação defendida e julgada em 24/03/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **EVANDRO LUIS LINHARI RODRIGUES** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Associado **ADILSON GONZAGA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Dr^a. **FATIMA MARIA MITSUE YASUOKA**
(Opto Eletrônica S/A)

Aprovado

Prof. Titular **DENIS VINÍCIUS COURY**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho a Cátia, que me trouxe João Pedro e Bruna.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Mário Stefani e Sr. Nelson Maurici, diretores da Opto Eletrônica S.A., pelos recursos disponibilizados para este desenvolvimento.

Ao prof. Evandro, amigo de longa data, pelo grande apoio e paciência incansável.

Aos engenheiros Glauco Costal e Marcelo Cavalcante e ao físico Diego Lencione, da Opto Eletrônica S.A., pelo suporte técnico inestimável.

À Fátima e ao Adilson, pela fundamental contribuição na revisão deste trabalho.

*“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar.
É melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se, fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias frios em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver.”*

Martin Luther King

RESUMO

Martins, L. A. **Sistema de monitoramento óptico banda larga direto para fabricação de filmes finos multicamadas com sincronização *sensorless***. 2011. 108p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Para a fabricação de filtros ópticos com característica espectral crítica, utiliza-se a tecnologia de filmes finos multicamadas, a qual exige o monitoramento e controle de espessura dos filmes com alta precisão. O sistema tradicional de monitoramento de espessura de filmes, baseado em cristal ressonante, não atende aos requisitos de precisão e repetibilidade do processo exigidos para a fabricação deste tipo de filtro. Já o monitoramento óptico, por sua vez, é um sistema que atende aos requisitos de fabricação destes filtros. Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema automático de monitoramento óptico banda larga, para fabricação de filtros com filmes finos multicamadas, que se baseia na utilização de equipamentos ópticos de uso geral disponíveis no mercado. Para realizar análises de desempenho referentes exclusivamente ao algoritmo de automatização, um ambiente de simulação foi preparado, no qual os dados fornecidos pelo equipamento de aquisição de características ópticas durante a deposição efetiva foram substituídos por dados gerados por um algoritmo de simulação de crescimento do filme. Deste modo, o algoritmo de automatização e seus sistemas de segurança puderam ser exercitados. As simulações mostraram que o sistema proposto possui potencial para tornar mais preciso e repetitivo o processo de fabricação de filtros, de modo que atendam aos requisitos das aplicações especiais.

Palavras-chave: Processamento de sinais ópticos. Monitor óptico banda larga. Filtros ópticos multicamadas. Espectrofotômetro. Filmes finos.

ABSTRACT

Martins, L. A. **Broadband direct optical monitoring system for multilayer thin film manufacturing with sensorless synchronization.** 2010. 108p. Dissertation (Master degree) – Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Optical filter manufacturing with critical spectral characteristics uses multilayer thin film technology, which demands film thickness monitoring and control with high precision. Traditional monitoring systems based on oscillating crystal do not fulfill requirements of accuracy and process repeatability for manufacturing such type of filter. On the other hand, optical broadband monitoring system fulfills the manufacturing requirements to produce these filters. This work presents the development of a broadband optical monitoring system for multilayer thin film filters production, based on general optical equipment commercially available. In order to make the performance analysis related to automation algorithm, a simulation environment has been prepared, where the data supplied by optical data acquisition equipment has been replaced by simulating signals of film growing. Thus the automation algorithm and security systems could be worked. Simulations showed that the system has potential to improve the accuracy and repeatability of the manufacturing process so that the produced filters are able to fulfill the requirements of special applications.

Keywords: Optical signal processing. Broadband optical monitoring. Multilayer optical filters. Spectrophotometer. Thin films.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes ópticos especiais com cobertura de filmes finos multicamadas.....	30
Figura 2: Filtro multiespectral usado em CCD's para câmeras de satélites.	32
Figura 3: Estrutura básica de um filtro de filmes finos multicamadas.....	35
Figura 4: Efeitos ópticos de superfície e reflexões internas em um substrato sem filme	36
Figura 5: Efeitos de interferência sobre um feixe de luz incidente gerados por uma estrutura de filmes finos com três camadas depositadas num substrato.....	37
Figura 6: Exemplo das alterações de espectro causadas por uma pilha de filmes finos depositada sobre um substrato de vidro.	38
Figura 7: Sistema de evaporação com dispositivos de monitoramento.....	40
Figura 8: Diagrama do sistema de monitoramento óptico proposto.	47
Figura 9: Espectro de energia da fonte de luz detectada pelo sensor do espectrofotômetro.....	49
Figura 10: Espectro teórico do filtro atenuador projetado para o canhão.....	50
Figura 11: Espectro real de energia detectada com filtro equalizador.....	50
Figura 12: Diagrama de raios luminosos representando o caminho percorrido pelo feixe de luz.....	51
Figura 13: Tela gerada pelo algoritmo de monitoramento.	53
Figura 14: Comportamento da figura de mérito durante o processo de deposição.	54
Figura 15: Tela de teste do simulador de crescimento de filme.	58
Figura 16: Determinação da admitância óptica com polarização s (η_s).	61
Figura 17: Implementação do cálculo do fator de fase δ para polarização s....	62
Figura 18: Implementação do cálculo da matriz característica para polarização s.....	62
Figura 19: Dispositivo para testes do algoritmo de sincronismo <i>sensorless</i>	67
Figura 20: Detalhe do espectrofotômetro utilizado.	68
Figura 21: Tela do <i>software</i> auxiliar para determinação de índices de refração.	72

Figura 22: Tela do <i>software</i> com o método de Swanepoel implementado.....	76
Figura 23: Curva de transmitância de um filme de camada única fabricado com material de índice de refração e espessura conhecidos.....	77
Figura 24: Tela da interface com o usuário desenvolvida para simplificar a utilização do <i>software</i> PUMA.....	79
Figura 25: Espectro de transmitância gerado pelo CAD “Essential MacLeod” para um filme de camada única de 1000nm de TiO ₂ sobre vidro N-BK7...	80
Figura 26: Comparação do simulador (traçado em azul) com o <i>software</i> de projeto de filtros “Essential MacLeod” (traçado em vermelho).....	83
Figura 27: Introdução de variação fixa de -5% no índice de refração dos dois materiais utilizados na deposição dos filmes	84
Figura 28: Introdução de variação fixa de +5% no índice de refração dos dois materiais utilizados na deposição dos filmes	85
Figura 29: Tela do <i>software</i> de aquisição de dados espectrais e algoritmo de sincronização.....	86
Figura 30: Transmitância de um filtro durante a deposição simulada do filme, comparada ao valor teórico esperado ao final da camada.	87
Figura 31: Monitoramento da deposição efetiva de um filme de camada única de TiO ₂ com 500nm de espessura.	89
Figura 32: Curva gerada a partir das estimativas de espessura e tabela de índice de refração realizadas pelo algoritmo de Swanepoel.....	90
Figura 33: Projeto óptico do canhão de luz utilizando CAD Zemax.....	101
Figura 34: Canhão de luz com ajuste de foco e suporte com ajuste de alinhamento do feixe.....	102
Figura 35: Montagem do canhão de luz na parte inferior da câmara.	103
Figura 36: O canhão de luz montado sobre uma bancada de testes.	104
Figura 37: Diagrama do caminho percorrido pelo feixe de luz no sistema de coleta.	106
Figura 38: Projeto mecânico do sistema de coleta do feixe de luz.....	106
Figura 39: Tela do CAD "Essential Macleod".	107
Figura 40: Janela com a lista de <i>targets</i> do espectro final desejado.	108
Figura 41: Janela do projeto gerado pelo sintetizador do CAD.	109

Figura 42: Tela do CAD com o espectro de transmitância obtido com o projeto
gerado pelo sintetizador. 110

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAD – *Computer-aided Design* – Projeto auxiliado por computador

CCD – *Charge Coupling Device* – Dispositivo eletrônico para captura de sinais luminosos

CLP – Controlador Lógico Programável

LDR – *Light Dependant Resistor* – Dispositivo cuja resistência elétrica varia com a incidência de luz em sua superfície

PUMA - *Pointwise Unconstrained Minimization Approach* – Software para extração de características ópticas de materiais de filmes finos a partir da curva de transmitância

PVD – *Physical Vapor Deposition* – Deposição por evaporação física – um dos processos de deposição de filmes finos

RGB – Componentes *Red* (vermelho), *Green* (verde) e *Blue* (azul) da luz visível

RPM – Rotações por minuto

USB – *Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

B : Amplitude de campo elétrico normalizado.

H : Amplitude de campo magnético normalizado.

λ : Comprimento de onda da luz.

R : Reflectância. A razão entre a intensidade de luz refletida e a intensidade de luz incidente.

T : Transmitância. A razão entre a intensidade de luz transmitida e a intensidade de luz incidente.

n : Índice de refração. Parte real da admitância óptica.

k : Índice de extinção. É a parte imaginária da admitância óptica. Denota a presença de absorção.

y : Admitância óptica de um meio. No Sistema Internacional de unidades é medido em siemens.

η_p : Admitância óptica de um meio na polarização p .

η_s : Admitância óptica de um meio na polarização s .

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	27
1.1	Considerações iniciais	27
1.2	Objetivos e justificativas do trabalho	28
1.3	Motivação e relevância do trabalho.....	29
1.3.1	Aplicação de filtros ópticos	29
1.3.2	A dependência das empresas inovadoras brasileiras.....	30
1.3.3	Domínio da tecnologia de fabricação de filtros ópticos.....	31
1.4	Organização da dissertação	33
1.5	Publicações.....	33
2.	EMBASAMENTO TEÓRICO	35
2.1	Tecnologia de filtros de filmes finos multicamadas	35
2.2	O processo de deposição - a evaporadora	39
2.3	Sistemas de monitoramento	41
2.3.1	Monitoramento por cristal ressonante.....	42
2.3.2	Monitoramento óptico	43
3.	SISTEMA DE MONITORAMENTO PROPOSTO	47
3.1	Fonte de luz e canhão.....	48
3.1.1	Equalização do espectro da fonte de luz	48
3.2	Sistema de coleta do feixe de luz	51
3.3	O algoritmo de monitoramento.....	52
3.3.1	A figura de mérito	52
3.3.2	Implementação do algoritmo de monitoramento.....	53
3.3.3	Sistemas de proteção da deposição.....	55
3.4	Simulador de crescimento de filme	56
3.5	Ângulo de incidência não normal	60

3.6	Processo de aquisição de dados	63
3.7	Algoritmo de sincronização <i>sensorless</i> da posição do filtro na calota	63
3.7.1	Funcionamento do algoritmo	63
3.7.2	Inicialização do algoritmo	64
3.7.3	Filtragem de dados pelo “método do candidato”.....	65
3.7.4	Testes de desempenho	66
3.8	Proteções contra ruídos de iluminação.....	68
3.8.1	Tempo mínimo para identificar a referência	69
3.8.2	Janela de tempo para aceitação do filtro testemunha	69
3.8.3	Tempo máximo para identificação da referência T=100%.....	69
3.8.4	Tempo máximo para identificação do filtro testemunha.....	70
3.9	Correção dos índices de refração com a temperatura	70
3.9.1	Simulador de filme de camada única.....	71
3.9.2	Estimativa de índices de refração pelo método de Swanepoel	73
3.9.3	Estimativa de índices de refração com o <i>software</i> PUMA	78
3.10	Arquitetura de <i>software</i>	80
3.11	Método utilizado para o desenvolvimento do <i>software</i>	81
4.	RESULTADOS	83
4.1	Simulador de crescimento de filmes	83
4.2	Introdução de erros nos índices de refração.....	84
4.3	Algoritmo de sincronização <i>sensorless</i>	85
4.4	Algoritmo de monitoramento	86
4.4.1	Utilização de dados gerados pelo simulador de crescimento de filmes.....	87
4.4.2	Monitoramento de deposição efetiva de filmes.....	88
4.5	Estimativa de índice de refração com o método de Swanepoel.....	89
4.6	Estimativa de índice de refração com o <i>software</i> PUMA	90

5.	CONCLUSÕES	91
6.	PROPOSTAS PARA MELHORIAS FUTURAS.....	95
6.1.1	Método de pré-tratamento de MacLeod e Pelletier (1977)	95
6.1.2	Método de recálculo <i>online</i> de Vidal e Pelletier (1979b).....	96
6.1.3	Método de Tikhonravov, Trubetskov e Amotchkina (2006).....	96
6.1.4	Método de Zhupanov et al. (2009).....	96
	REFERÊNCIAS.....	97
	APÊNDICE A - Projeto óptico e mecânico do canhão de luz	101
	APÊNDICE B - Sistema de coleta de luz	105
	ANEXO A - Projeto de filtros de filmes finos multicamadas	107

1. INTRODUÇÃO

Apresentam-se neste capítulo as considerações iniciais, os objetivos e justificativas que levaram ao desenvolvimento deste trabalho, além da motivação e relevância da utilização de seus resultados.

1.1 Considerações iniciais

Dispositivos optoeletrônicos são cada vez mais utilizados nas mais diversas aplicações. Determinadas aplicações especiais, tais como câmeras digitais de alta resolução baseadas em detectores do tipo *Charge Coupling Device* (CCD), equipamentos médicos para tratamentos oftalmológicos, lasers e sistemas de defesa, necessitam de diversos componentes ópticos, entre eles: lentes, janelas, prismas, *beam splitters*, etc. A maioria destes componentes necessita receber uma cobertura especial (*coating*) para se adequar a requisitos de desempenho óptico. Esta cobertura especial, também chamada de “filme”, utiliza na maioria das vezes a tecnologia de filmes finos multicamadas. Esta tecnologia permite a fabricação desde filmes relativamente simples, apenas para diminuição da reflexão (conhecidos como filmes antirreflexo), chegando até a realizar funções de filtragens ópticas complexas, de acordo com a faixa de comprimentos de onda de interesse. Com o crescente aumento da complexidade dos equipamentos, os requisitos destes filtros permitem tolerâncias cada vez menores, em termos de características espectrais.

Para realizar a deposição de filmes finos sobre componentes ópticos, o processo mais utilizado é o de evaporação por feixe de elétrons, numa câmara de alto vácuo. O equipamento que realiza este processo é conhecido como “evaporadora”, cujo funcionamento é descrito por MacLeod (2001). Este equipamento possui diversos sistemas de controle automáticos que são fundamentais para a realização do processo de deposição. Um deles é o sistema de monitoramento e controle da espessura do filme depositado, foco

deste trabalho. O controle de espessura de cada camada de filme durante o processo de deposição possui importância primordial para que o filtro produzido atenda à característica espectral desejada.

O sistema de monitoramento de espessura de filmes mais comum, baseado em cristal de quartzo ressonante, não atende aos requisitos de precisão da medida de espessura dos filmes utilizados nos filtros para aplicações especiais. Este sistema é descrito por diversos autores, entre eles MacLeod (1972) e Badoil et al. (2007). Um sistema que permite um monitoramento com melhor precisão é baseado no princípio de monitoramento óptico, proposto inicialmente por MacLeod (1972), onde se utiliza um sistema de medição de transmitância de comprimento de onda discreto. Já o monitoramento óptico banda larga, cujo princípio de funcionamento foi proposto por Vidal, Fornier e Pelletier (1979a) é um sistema que atende aos requisitos de fabricação destes filtros. É neste princípio que se baseia o desenvolvimento da proposta deste trabalho. A idéia básica é realizar a medição de características ópticas não apenas em um comprimento de onda discreto, mas numa determinada faixa, utilizando-se um espectrofotômetro, e comparar o espectro real com o esperado (teórico) utilizando-se uma figura de mérito.

Este tipo de equipamento já é fabricado comercialmente por empresas européias, e o equipamento aqui descrito é o único projetado e implementado totalmente no Brasil. O domínio desta tecnologia está dentro do escopo deste trabalho.

1.2 Objetivos e justificativas do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta de melhoria do processo de fabricação de filtros de filmes finos multicamadas, por meio de um sistema de monitoramento óptico banda larga direto.

Este trabalho é justificado devido ao alto custo dos monitores ópticos banda larga comercialmente disponíveis, especificamente para câmaras de evaporação de filmes finos, o que inviabiliza sua aquisição por empresas de pequeno e médio porte. Para atender ao requisito de custo, o sistema proposto foi implementado com equipamentos optoeletrônicos de uso geral, disponíveis no mercado. O custo total é da ordem de um décimo do custo dos monitores ópticos comerciais.

Outra justificativa está relacionada à questão da restrição de comercialização de determinados filtros ópticos imposta pelos governos de diversos países, por questão de segurança nacional. Esta restrição impede o desenvolvimento de alguns equipamentos de defesa por empresas brasileiras. Por serem filtros extremamente complexos, sua fabricação só é viável com a utilização de monitor óptico de filmes finos.

1.3 Motivação e relevância do trabalho

A motivação e a relevância deste trabalho tornam-se claras quando se identifica o papel dos filtros ópticos dentro de diversos equipamentos de alta tecnologia, além da importância do domínio desta tecnologia para a empresa nacional. Estas considerações são apresentadas a seguir.

1.3.1 Aplicação de filtros ópticos

Filtros ópticos são componentes que muitas vezes nem se dá conta de sua existência nos produtos, pois podem estar presentes na superfície de lentes, muitas vezes invisíveis a olho nú, mas cujo bom funcionamento pode ser a diferença entre o produto realizar sua função básica ou não. Outras vezes verifica-se a presença dos filtros, mas devido à simplicidade aparente, sua

importância é deixada em segundo plano, em detrimento de outros sistemas aparentemente mais complexos e tecnológicos.

A figura 1 mostra alguns exemplos de componentes ópticos especiais. A função óptica específica de cada um deles depende, entre outras coisas, da aplicação de coberturas fabricadas com tecnologia de filmes finos multicamadas.

Figura 1: Componentes ópticos especiais com cobertura de filmes finos multicamadas.

Fonte: Opto Eletrônica S.A.

1.3.2 A dependência das empresas inovadoras brasileiras

É comum que empresas brasileiras, por razões de ordem financeira, adquiram equipamentos seminovos de empresas estrangeiras, e realizem diversas ações de atualização destes equipamentos, de modo a torná-los suficientemente operacionais. Esta ação de atualização é conhecida como *retrofitting*.

Enquanto as empresas nacionais concentram seus esforços para realizar a tarefa de adequação destes equipamentos e processos relacionados, as empresas estrangeiras desenvolvem novos produtos, calcados em novos componentes, cuja fabricação só é possível por meio do desenvolvimento de novos processos de fabricação e de novos equipamentos. Esta estrutura gera sempre uma defasagem tecnológica em diversos níveis da cadeia produtiva, não apenas em relação ao produto final em si, mas também (e muitas vezes principalmente) quanto aos equipamentos e processos necessários para a fabricação dos componentes fundamentais para o bom funcionamento destes novos produtos.

Todo produto colocado no mercado considerado inovador traz consigo toda uma cadeia de componentes, processos e equipamentos, que muitas vezes estão carregados de inovações tecnológicas em um nível mais elevado que o produto final em si. Também novas relações de dependência entre empresas fornecedoras e clientes são criadas, outras encerradas, e muitas destas relações têm sua importância profundamente alterada. Como normalmente esta cadeia inovadora é transparente para o usuário em geral, o valor percebido de um produto fica limitado ao nível do material físico adquirido e de sua funcionalidade.

1.3.3 Domínio da tecnologia de fabricação de filtros ópticos

Poucas empresas no Brasil possuem o equipamento para deposição de filmes finos e a maioria delas utiliza este equipamento para aplicação de tratamento antirreflexo em lentes de óculos. Dentre as empresas que possuem o equipamento, poucas detêm o *know how* e a tecnologia para fabricação de filtros ópticos especiais. Poucas empresas no mundo dominam o processo de fabricação de determinados tipos de filtros, como por exemplo, filtros multiespectrais para utilização em câmeras de imageamento orbital. Este tipo de componente é considerado estratégico e sua venda para outros países é bastante restringida pelos governos.

A figura 2 mostra um tipo de filtro óptico multiespectral utilizado em CCD's de câmeras de satélite.

Figura 2: Filtro multiespectral usado em CCD's para câmeras de satélites.

O filtro multiespectral tem a função de decompor a luz em componentes *Red*, *Green* e *Blue* (RGB) mais uma componente de infravermelho. Este tipo específico de componente é composto pela associação de quatro filetes de filmes finos depositados no mesmo substrato. Cada filete de filmes realiza a função de filtragem numa banda espectral específica. A filtragem consiste em transmitir determinados comprimentos de onda e refletir outros, de modo seletivo. O detalhe em *zoom* da figura 2 mostra as quatro bandas do filtro, sendo que a coloração de cada banda corresponde à combinação dos comprimentos de onda refletidos.

Para a fabricação deste componente são necessários equipamentos de alta precisão, incluindo monitoramento óptico de deposição de filmes finos, devido às diversas etapas de deposição que precisam ser realizadas no mesmo substrato. Caso ocorram problemas em uma das etapas de deposição, a fabricação tem que ser retomada do zero, pois uma vez depositado o filme não há como corrigir possíveis falhas. Pouquíssimas empresas no mundo detêm a tecnologia necessária para fabricação deste tipo de filtro e, além disso, sua

comercialização depende de um longo processo para obter permissão governamental para exportação.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, sendo que o primeiro deles é composto por esta introdução. O segundo capítulo apresenta a teoria básica de filtros com filmes finos multicamadas e o estado da arte de sistemas de monitoramento. O terceiro capítulo discorre sobre os métodos utilizados para o desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações, testes em bancada e testes em aplicação efetiva. O quinto capítulo discute as conclusões e o sexto capítulo indica melhorias a serem implementadas. Complementando o trabalho, o Apêndice A apresenta detalhes do projeto mecânico do canhão de luz, o Apêndice B descreve o funcionamento do sistema de coleta de luz e o Anexo A traz uma descrição geral de um *software* comercial que auxilia no desenvolvimento do projeto de filtros com filmes finos multicamadas.

1.5 Publicações

Um artigo relacionado com este trabalho foi publicado nos anais e apresentado em forma oral no Congresso Brasileiro de Automática 2010 (CBA2010), com o título: "SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO ÓPTICO BANDA LARGA, EM TEMPO REAL, PARA FABRICAÇÃO DE FILTROS COM FILMES FINOS MULTICAMADAS".

Outro artigo foi submetido ao periódico Journal of Instrumentation (2010) com o título: "SENSORLESS SYNCHRONIZATION METHOD FOR THIN FILM DIRECT OPTICAL BROADBAND MONITORING SYSTEM". O processo de submissão deste artigo encontra-se em fase de revisão.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo apresenta-se a teoria básica de filtros com filmes finos multicamadas, além de uma descrição do processo de deposição e dos sistemas de monitoramento de espessura de filmes.

2.1 Tecnologia de filtros de filmes finos multicamadas

Filtros ópticos de filmes finos multicamadas são estruturas compostas por um substrato (vidro óptico) sobre o qual são depositadas diversas camadas alternadas de dois materiais. Utiliza-se normalmente um material de alto índice de refração (representado pela letra “H”) e outro de baixo índice de refração (representado pela letra “L”). O número de camadas, a espessura de cada camada, o índice de refração do substrato e o índice de refração dos materiais dos filmes determinam a característica espectral do filtro. A figura 3 ilustra a estrutura básica de um filtro de filmes finos.

Figura 3: Estrutura básica de um filtro de filmes finos multicamadas.

Os materiais mais utilizados para deposição de filmes finos em filtros ópticos são: dióxido de titânio (TiO_2) como material tipo “H”, e dióxido de silício (SiO_2)

como material tipo “L”. O material TiO_2 tem índice de refração de $2,35@510\text{nm}$ e o material SiO_2 tem índice de refração de $1,46@510\text{nm}$.

Dentre outros materiais utilizados na deposição de filmes para aplicação em óptica, pode-se citar também: germânio (Ge), fluoreto de ítrio (YF_3), dióxido de háfnio (HfO_2), fluoreto de magnésio (MgF_2), óxido de ítrio (Y_2O_3), óxido de alumínio (Al_2O_3). Cada um destes materiais pode ser selecionado dependendo da faixa espectral e dos requisitos de robustez. Estes materiais ainda não são fabricados no Brasil. Deve-se utilizar materiais produzidos especificamente para utilização em deposição de filmes finos. Como exemplo, pode-se citar alguns dos fabricantes destes materiais: DonCo Ltd. (2010), Cerac Inc. (2010) e Umicore (2010).

Esta pilha de filmes depositados tem por objetivo alterar as características ópticas superficiais do substrato. Um substrato sem filme aplicado apresenta características superficiais de reflexão e refração semelhantes em ambas as faces, que podem ser alteradas conforme a necessidade com a aplicação da pilha de filmes adequada. A figura 4 apresenta os principais efeitos ópticos que ocorrem em um substrato sem filme.

Figura 4: Efeitos ópticos de superfície e reflexões internas em um substrato sem filme. A parcela de luz que atravessa uma interface indica a transmitância (T) e a parcela refletida indica a reflectância (R).

Fonte: MacLeod (2001).

Um feixe de luz que atravessa o substrato deve passar por duas superfícies, nas quais ocorre mudança de meio (interface). Nas duas superfícies ocorrem os fenômenos de reflexão e refração, e em cada uma delas pode ser aplicado um filtro de filmes finos diferente, sendo que o resultado óptico final é a composição dos dois filtros mais o efeito do substrato.

As alterações espectrais realizadas pelos filtros de filmes finos são geradas pelos efeitos ópticos que ocorrem dentro da estrutura em pilha. Os fenômenos superficiais de reflexão e refração da luz no substrato são ajustados cuidadosamente, de modo a controlar o efeito óptico na faixa espectral desejada. A figura 5 ilustra os efeitos causados por uma pilha de filmes de três camadas (*Layer 1*, *Layer 2* e *Layer 3*) sobre um feixe de luz incidente.

Figura 5: Efeitos de interferência sobre um feixe de luz incidente gerados por uma estrutura de filmes finos com três camadas depositadas num substrato.

Fonte: MacLeod (2001).

Cada um dos meios tem uma admitância óptica¹ y própria, sendo y_0 a admitância do meio incidente (no caso, o ar), y_1 , y_2 e y_3 as admitâncias dos

¹ A admitância óptica y de um meio é uma grandeza composta pelo índice de refração n e o índice de extinção k . É medida em siemens.

materiais dos filmes e y_{sub} a admitância do substrato. O espectro do filtro é alterado pela combinação dos raios refletidos ρ_a , ρ_b , ρ_c e ρ_d nas quatro interfaces (a, b, c e d), por meio de interferência construtiva e destrutiva em função das defasagens δ_1 , δ_2 e δ_3 . A intensidade e defasagem dos raios refletidos dependem basicamente da espessura das camadas e da admitância de cada meio. Para que este fenômeno ocorra de modo a produzir os efeitos ópticos desejados, as espessuras das camadas devem ser da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda da luz, ou seja, nanômetros. Um exemplo do efeito da alteração espectral de uma pilha de filmes depositada sobre um substrato pode ser visto na figura 6.

Figura 6: Exemplo das alterações de espectro causadas por uma pilha de filmes finos depositada sobre um substrato de vidro.

Fonte: MacLeod (2004).

A figura 6 mostra as alterações ópticas causadas em um substrato com espectro de transmittância original em torno de 92%, aproximadamente plana na faixa de 900 a 1100nm, que passou a se comportar como um filtro passa-faixa com banda de passagem de 980 a 1020nm. Além disso, dentro da faixa de passagem, a transmittância foi elevada de 92% para 99% em média.

As primeiras aplicações de filtros de filmes finos foram feitas em lentes de instrumentos ópticos de precisão, com o objetivo de aumentar a eficiência das lentes. São os chamados filmes antirreflexo. Atualmente a aplicação de filme antirreflexo para lentes de óculos está se popularizando devido à redução dos custos do processo e dos materiais utilizados.

2.2 O processo de deposição - a evaporadora

Um dos métodos de deposição mais utilizados é o processo chamado *Physical Vapor Deposition* (PVD), o qual se baseia na evaporação dos materiais especiais para filmes finos e sua posterior solidificação sobre a superfície do substrato. Pode-se realizar a evaporação por métodos de aquecimento por resistência elétrica ou por feixe de elétrons de alta potência. Os materiais evaporados geram uma nuvem de partículas que serão depositadas sobre toda a superfície interna da câmara. O processo de evaporação deve ser realizado num ambiente de alto vácuo para eliminação de impurezas e umidade. Existem duas etapas de vácuo, sendo a primeira realizada por uma bomba de vácuo mecânica e uma segunda etapa de vácuo profundo, realizado por uma bomba difusora.

Conforme pode ser observado na figura 7, na parte superior interna da câmara existe um suporte para posicionar os componentes que receberão o filme. Este suporte é chamado de calota. A calota é provida de movimento giratório, numa velocidade em torno de 20 rotações por minuto (RPM), para promover a homogeneidade do filme depositado.

Figura 7: Sistema de evaporação com dispositivos de monitoramento.

Fonte: OnLink Technologies (2010).

Ainda na parte superior interna, no centro da calota, existe um sistema de monitoramento de espessura de filme, baseado em cristal ressonante. É composto por um tubo cilíndrico, e em sua extremidade está posicionado um dispositivo tipo carrossel com um conjunto de cristais. Logo acima da calota existe um sistema de aquecimento com resistência elétrica, para elevar a temperatura dos componentes que receberão o filme. O aquecimento é necessário para promover a adesão do filme na superfície dos substratos. Em alguns equipamentos é utilizada uma fonte de plasma para promover a adesão e aumentar a densidade do filme depositado. O uso do plasma proporciona a diminuição da temperatura necessária para obter adesão do filme na superfície dos substratos, gerando menor *stress*, maior robustez e melhor qualidade óptica do filme depositado.

As paredes da câmara são refrigeradas por serpentinas de água gelada, por motivos de segurança para operação do equipamento e também para que o controle de temperatura interna da câmara funcione adequadamente.

O controle da evaporadora é feito por um computador central e por Controlador Lógico Programável (CLP), que se comunicam por meio de interface serial padrão RS-232. A seguir são listados alguns sistemas de controle:

- Varredura do feixe de elétrons de alta potência;
- Potência do feixe de elétrons;
- Carrossel de cadinhos;
- *Shutter*² dos cadinhos;
- Temperatura do aquecedor dos substratos;
- Medidor de espessura a cristal;
- Refrigeração da estrutura da câmara;
- Bomba de vácuo;
- Bomba difusora;
- Injeção de oxigênio;
- Sistema de rotação da calota (*rotary*).

2.3 Sistemas de monitoramento

Diversos autores apresentaram análises de métodos e sistemas de monitoramento de filmes finos, comparando-os com o sistema baseado em cristal ressonante; assim fez Badoil et al. (2007). Também há autores que comparam os resultados de filtros produzidos utilizando-se monitores ópticos banda larga (*broadband*) com aqueles produzidos com monitores ópticos banda estreita (*monochromatic*), como fez Vidal, Fornier e Pelletier (1978). A seguir descreve-se o princípio de funcionamento de alguns sistemas de monitoramento para fabricação de filtros de filmes finos.

² *Shutter* é um dispositivo que permite bloquear a geração da nuvem de material evaporado. Fica posicionado sobre o carrossel de materiais.

2.3.1 Monitoramento por cristal ressonante

O sistema de monitoramento de espessura mais utilizado em câmaras de evaporação de filmes finos é baseado em cristal de quartzo ressonante. É o dispositivo original de medição de espessura da evaporadora utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Apenas um dos cristais do carrossel fica exposto à deposição de filmes por meio de uma janela do carrossel. O operador pode trocar o cristal exposto à deposição conforme a necessidade. Enquanto o filme vai sendo depositado sobre os substratos, também ocorre deposição sobre o cristal exposto. O corpo do dispositivo de carrossel é refrigerado a água, para evitar variações na medição em função da temperatura. A frequência do cristal é medida com um equipamento específico, por exemplo, do fabricante Inficon (2010), que realiza a medição e se comunica com o computador principal por meio de uma interface serial padrão RS-232.

O filme depositado sobre a superfície do cristal gera um efeito físico sobre o mesmo, alterando sua frequência de ressonância. A partir da variação de frequência de ressonância infere-se a espessura do filme depositado e a taxa de deposição (*rate*). Este método é descrito por MacLeod (2001).

Conforme as camadas vão se alternando e filme vai sendo depositado, ocorre em um determinado momento a saturação do cristal e sua frequência de ressonância deixa de variar com a deposição de mais filme ou responde de forma irregular. A saturação do cristal deve ser detectada pelo operador, que atua no processo de modo a acionar o motor do carrossel de cristais, trocando o cristal exposto à deposição de filme.

Este sistema possui diversos inconvenientes que geram erros de medida. Como a alteração da frequência de ressonância ocorre devido à variação de massa e outras propriedades físicas, falhas de homogeneidade da deposição ou alteração de densidade do material evaporado não são detectadas. Além

disso, como a distribuição da deposição de filme não é homogênea em toda a superfície interna da câmara, e pelo fato do cristal não estar posicionado na calota, é necessário aplicar um fator de correção. Desta forma, é necessário determinar os fatores de deposição dos materiais, ou seja, a relação entre a espessura de filme depositada sobre o cristal e a espessura do filme efetivamente depositada sobre os componentes ópticos posicionados na calota. É relevante notar que quaisquer alterações físicas do sistema geram alteração deste fator, dentre elas:

- Espessura da camada de filme;
- Taxa de deposição (*rate*);
- Posição do carrossel de materiais (*Set*);
- Quantidade de material não evaporado no cadinho;
- Perfil de varredura do feixe sobre o material do cadinho;

A necessidade de ajuste de todos estes itens torna o processo pouco repetitivo, gerando uma quantidade muito grande de testes pré-fabricação, e sem a garantia que a deposição final sobre os componentes será realizada corretamente. Tudo depende da manutenção ou não das características físicas do equipamento. Muitas vezes perde-se um lote inteiro de componentes devido a variações aleatórias durante a deposição.

2.3.2 Monitoramento óptico

Na fabricação de filmes mais simples para aplicações gerais, como tratamento antirreflexo para lentes oftálmicas, que são constituídos por filmes com poucas camadas e de espessuras não críticas, o monitoramento com cristal atende perfeitamente. Mas para filtros de filmes finos com especificação mais rigorosa, onde o número de camadas aumenta consideravelmente, os erros acumulados durante a deposição das diversas camadas resulta num filtro fora da especificação e repetibilidade do processo muito baixa.

A alternativa mais utilizada para o sistema de cristal ressonante é o sistema óptico de MacLeod (1972). Este sistema acompanha a evolução da característica óptica dos componentes durante o processo de deposição de filmes. A principal vantagem do monitoramento óptico é o fato de se realizar a medição direta da grandeza que mais importa para os filtros: a característica óptica.

Para que este tipo de sistema funcione adequadamente, é necessário um estudo de pré-produção, com o objetivo de obter a característica espectral teórica ao final da deposição de cada camada de filme. Para esta análise, utiliza-se uma ferramenta do tipo *Computer-aided Design* (CAD) específica para projeto de filtros com filmes finos multicamadas. Tal ferramenta tem como função principal auxiliar na determinação do número de camadas e suas respectivas espessuras, a partir dos requisitos de transmitância, reflectância, absorção, ângulo de incidência de luz, etc. Esta ferramenta também auxilia na determinação da característica espectral camada a camada. O conjunto de informações espectrais camada a camada é conhecido como *runsheets*. A *runsheets* pode ser gerada para ser utilizada por monitores ópticos banda larga (com informação espectral de uma determinada faixa espectral de interesse) ou banda estreita, onde se determina a variação da característica espectral em um comprimento de onda discreto.

Existem diversas maneiras de se classificar um sistema de monitoramento óptico de filtros com filmes finos multicamadas. A seguir detalha-se a classificação destes sistemas.

2.3.2.1 Monitoramento banda larga

Analisa toda uma faixa espectral de interesse. Compara a característica espectral real com a teórica (desejada) utilizando figuras de mérito. Utiliza normalmente um sensor óptico tipo CCD com grade de difração e uma fonte de luz banda larga.

2.3.2.2 Monitoramento banda estreita

Analisa um comprimento de onda discreto. Utiliza sensores do tipo fototransistor ou *Light Dependant Resistor* (LDR), dependendo da região espectral. Pode utilizar fonte de luz banda larga ou estreita.

2.3.2.3 Monitoramento direto

Quando o feixe de luz da fonte é aplicado no próprio componente sendo fabricado ou então num corpo de prova (também conhecido por filtro “testemunha”) posicionado na calota da evaporadora.

2.3.2.4 Monitoramento indireto

Quando o feixe de luz é aplicado num corpo de prova posicionado fora da calota. O corpo de prova é um componente de substrato e geometria padrão, que apenas serve para realizar a medição, e que será descartado após o processo de deposição. Normalmente é um componente que permanece fixo, não posicionado na calota em movimento. É necessário fazer uma correção do valor medido, conhecida por “Fator de Configuração”. Esta correção é descrita por Van der Laan (1986).

2.3.2.5 Monitoramento semidireto

As medições são realizadas em vários corpos de prova lidos de maneira indireta. Utiliza-se um carrossel motorizado semelhante ao sistema de cristais, que deixa exposto apenas um dos corpos de prova de cada vez. Um destes corpos nunca recebe filme, pois é utilizado apenas para calibração periódica do sistema de medição durante o processo. O carrossel é acionado no início da deposição de cada camada e a seqüência de exposição dos corpos de prova é feita de modo planejado, com o objetivo de obter o máximo contraste espectral entre as camadas. Este sistema foi apresentado por Zhupanov et al. (2009).

3. SISTEMA DE MONITORAMENTO PROPOSTO

A figura 8 apresenta um diagrama do sistema de monitoramento proposto. O corpo de prova monitorado está posicionado na calota e gira junto com os componentes em produção, mas não tem necessariamente a mesma geometria e tipo de substrato. O corpo de prova utilizado para o sistema de medição pode ser aproveitado como componente para uso final caso seu material e geometria atendam aos requisitos, caso contrário será descartado ao final do processo de deposição, devendo ser trocado para realização de um novo processo de deposição.

Figura 8: Diagrama do sistema de monitoramento óptico proposto.

O sistema proposto pode ser considerado um espectrofotômetro embarcado de tempo real, apresentado por Martins e Rodrigues (2010), e seus subsistemas são descritos a seguir.

3.1 Fonte de luz e canhão

A fonte de luz deve ser obrigatoriamente banda larga devido ao princípio de monitoramento utilizado. Durante o desenvolvimento foi utilizada uma fonte de luz comercial, que controla a intensidade de uma lâmpada halógena de 150W. A fonte de luz é conectada por uma fibra óptica a um canhão de luz, posicionado na parte inferior da câmara, e o feixe de luz é direcionado para o filtro testemunha posicionado na calota. Um sistema óptico de lentes (canhão) deve ser utilizado para focalizar o feixe, além de um sistema mecânico de ajuste para direcioná-lo para o filtro testemunha, na parte superior da câmara da evaporadora. Os detalhes de projeto do canhão de luz são apresentados no Apêndice A.

A fibra óptica utilizada para conectar a fonte de luz ao canhão deve ter capacidade de transmitir alta potência, com baixas perdas, e também deve ter capacidade de transportar luz banda larga, com característica de atenuação mais homogênea possível. Outra característica desta fibra é que ela precisa ser fabricada com material adequado para trabalhar com ultravioleta, conhecida como fibra *anti-solarization*. Os materiais das fibras ópticas de modo geral são altamente degradados com a aplicação de luz ultravioleta.

3.1.1 Equalização do espectro da fonte de luz

O espectro ideal de energia detectada da fonte de luz deve ser o mais homogêneo possível, para que não ocorra saturação de sinal do sensor CCD do espectrofotômetro, nem baixa intensidade, que poderia causar erros e até

mesmo impedir a realização da medição. A figura 9 mostra o espectro de energia da fonte de luz detectada pelo sensor do espectrofotômetro. Nota-se a baixa intensidade de energia detectada nas faixas de 300 a 400nm e 800 a 1100nm, comparada com a faixa central de 500 a 700nm.

Figura 9: Espectro de energia da fonte de luz detectada pelo sensor do espectrofotômetro.

Este desequilíbrio de intensidades gera erros graves na medição. O espectro de energia detectada é resultante de dois fatores básicos: o perfil espectral da fonte de luz utilizada e a sensibilidade do CCD do espectrofotômetro em função do comprimento de onda. A baixa intensidade na faixa de 300 a 400nm é causada principalmente pelos baixos níveis de luz ultravioleta da fonte de luz utilizada. Por outro lado, a baixa intensidade na faixa acima de 800nm é causada pela queda de sensibilidade do detector do espectrofotômetro.

Foi desenvolvido um filtro equalizador com o objetivo de corrigir o espectro de energia detectada. O filtro foi projetado para atenuar a banda central da luz visível, evitando saturação do CCD do espectrofotômetro, além de evitar baixos níveis nas extremidades da faixa espectral. O espectro teórico esperado para este filtro está mostrado na figura 10.

Figura 10: Espectro teórico do filtro atenuador projetado para o canhão de luz.

Com a inclusão do filtro equalizador, o espectro de energia detectada da fonte de luz passou a apresentar a característica mostrada na figura 11.

Figura 11: Espectro real de energia detectada com filtro equalizador.

Nota-se que o filtro melhorou a característica de energia detectada, mas não resolveu completamente o problema de homogeneidade. A solução para este problema está na substituição da fonte de luz e na utilização de outro espectrofotômetro com maior sensibilidade na faixa espectral acima de 800nm.

3.2 Sistema de coleta do feixe de luz

A parcela do feixe de luz transmitido pelo filtro testemunha, no qual o filme está sendo depositado, é coletada por um sistema posicionado na parte superior interna da câmara de evaporação. Tal sistema é detalhado no Apêndice B.

Para ser coletado, o feixe de luz passa por diversos dispositivos ópticos que guiam o feixe para o lado externo da câmara até chegar ao espectrofotômetro portátil de alta velocidade, que realiza a aquisição de dados espectrais. Os dados são transferidos ao computador por uma interface padrão *Universal Serial Bus* (USB). Desta forma, pode-se acompanhar a evolução da característica óptica do filtro durante a deposição do filme em tempo real.

A figura 12 apresenta um diagrama de raios luminosos representando o caminho completo percorrido pelo feixe de luz.

Figura 12: Diagrama de raios luminosos representando o caminho percorrido pelo feixe de luz.

3.3 O algoritmo de monitoramento

Apresentam-se aqui a teoria envolvida e os detalhes da implementação do algoritmo de monitoramento.

3.3.1 A figura de mérito

O monitoramento banda larga se baseia na comparação da característica espectral real (obtida pelo espectrofotômetro) com a característica esperada teórica (obtida com a geração da *runsheets*), comparação esta realizada em toda a banda espectral de interesse. Como se tratam de funções, a comparação pode ser realizada por meio de figura de mérito, conforme proposto por Vidal, Fornier e Pelletier (1978). A figura de mérito é uma grandeza que indica o grau de similaridade entre duas funções. Quanto menor o valor da figura de mérito, mais semelhantes elas são. Para determinar a figura de mérito utilizou-se a equação (1).

$$f_j = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_j(\lambda, e_j) - T_j(\lambda, e)| d\lambda \quad (1)$$

Em que:

- f_j = figura de mérito da camada j ;
- j = número da camada;
- T_j = transmitância teórica do filtro ao final da deposição da camada j ;
- e = espessura real da camada j ;
- e_j = espessura teórica final da camada j ;
- λ = comprimento de onda;

3.3.2 Implementação do algoritmo de monitoramento

O algoritmo de monitoramento foi implementado utilizando-se a plataforma LabView®. A interface do *software* desenvolvido pode ser vista na figura 13.

Figura 13: Tela gerada pelo algoritmo de monitoramento: a deposição de cada camada é finalizada quando é identificado o ponto de mínimo da figura de mérito.

Pode-se observar na tela da figura 13 o espectro final esperado do filtro (gráfico no lado superior direito), os espectros comparativos de cada camada, teórico e real, sobrepostos (gráfico no lado superior esquerdo) e o comportamento da figura de mérito durante a deposição (gráfico no canto inferior esquerdo). Indicadores próximos ao gráfico da figura de mérito informam se está havendo convergência ou divergência. O sistema identifica o momento correto de finalizar a deposição de cada camada, baseado na primeira derivada da figura

de mérito em relação ao tempo. O algoritmo verifica continuamente a ocorrência do ponto de mínimo da figura de mérito. Existe ainda a possibilidade de se finalizar manualmente a deposição de cada camada, caso se verifiquem quaisquer anomalias no processo de deposição. O sistema informa graficamente se o valor da figura de mérito está aumentando (condição de divergência) ou diminuindo (condição de convergência). O comportamento da figura de mérito pode ser visto no gráfico na figura 14.

Figura 14: Comportamento da figura de mérito durante o processo de deposição.

O *software* também permite selecionar o projeto do filtro desejado a partir de um banco de dados, além do ajuste de uma série de parâmetros, como faixa de comprimentos onda, habilitação ou não das proteções, fator de *timeout*, etc.

Foi desenvolvido um sistema para introduzir erros percentuais nos índices de refração dos materiais do filtro, com o objetivo de analisar o comportamento do algoritmo de monitoramento em condições extremas de falhas de deposição. Diversos projetos foram analisados com este sistema, alterando-se a porcentagem de erro introduzido em várias combinações.

3.3.3 Sistemas de proteção da deposição

O algoritmo possui sistemas de proteção, para evitar que a deposição se estenda indefinidamente no caso de não haver convergência da característica espectral do filme em deposição. Estes sistemas são importantes devido ao fato de que, uma vez depositado o filme, não existe a possibilidade de retorno. Todo o processo deve ser reiniciado do zero, com novas peças, novo processo de vácuo, etc.

O sistema de medição por cristal ressonante, original do equipamento utilizado, não foi retirado. A informação de taxa de deposição fornecida pelo cristal é muito importante, pois com ela é possível realizar a estimativa do tempo de deposição de cada camada, e definir um tempo máximo permitido para finalização da camada (*timeout*). A medição do cristal também é realizada em tempo real e pode variar bastante durante a deposição dos filmes. Tudo depende da quantidade de material nos cadinhos, da quantidade de energia aplicada para o feixe de elétrons, da complexidade do filme a ser depositado, etc. A informação da taxa de deposição também é importante para o operador verificar e ajustar o sistema de varredura do feixe de elétrons, ou realizar a troca do cadinho do carrossel de materiais. A proteção por *timeout* trabalha em conjunto com a condição de divergência. Ela só atua efetivamente caso o espectro real esteja divergindo do teórico, ou seja, se a derivada da figura de mérito é positiva enquanto o filme vai sendo depositado. Esta associação foi identificada após as simulações indicarem que, mesmo com a inclusão de erros no índice de refração dos materiais, é possível minimizar os efeitos destes erros ajustando-se a espessura das camadas durante a deposição. Em alguns casos a proteção de *timeout* atuou indevidamente enquanto o sistema estava conseguindo se recuperar do erro, depositando uma camada de espessura maior que a teórica. Caso a proteção de *timeout* seja ativada, o sistema encerra o processo automaticamente, pois considera que não há mais como haver convergência da característica espectral.

Outra proteção adicionada é a do *merit threshold*. Neste caso a figura de mérito é comparada com um valor predefinido, e se for menor que este valor, significa que o nível de semelhança das funções é grande o suficiente. A deposição da camada atual pode então ser encerrada, independentemente do ponto de mínimo da figura de mérito ter sido atingido ou não.

3.4 Simulador de crescimento de filme

Para verificar a funcionalidade do sistema de monitoramento e controle, foi desenvolvido um simulador de crescimento de filme. Sua implementação foi baseada no equacionamento de filtros com filmes finos extraído de MacLeod (2001), onde são apresentadas as formas das “matrizes características” de um filtro de filmes finos com “q” camadas. Para cada camada é necessário determinar uma matriz característica, cuja forma está indicada no produtório da equação (2).

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^q \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{isen \delta_j}{y_j} \\ iy_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ y_{sub} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Em que

- B = campo elétrico normalizado;
- C = campo magnético normalizado;
- q = número total de camadas;
- j = número da camada;
- i = unidade imaginária;
- δ_j = fator de fase da camada j;
- y_j = admitância do material da camada j;
- y_{sub} = admitância do substrato;

Para a determinação das admitâncias y_j e y_{sub} , utiliza-se a equação (3).

$$y_j = n_j - ik_j \quad (3)$$

Em que:

y_j = admitância do material da camada j ;

n_j = índice de refração do material da camada j ;

k_j = índice de extinção³ do material da camada j ;

Os valores de índice de refração n e extinção k são obtidos de tabelas dos fabricantes dos materiais dos filmes e do substrato. É importante ressaltar que tanto n quanto k são funções do comprimento de onda λ .

Para a determinação do fator de fase δ_j , utiliza-se a equação (4).

$$\delta_j = \frac{2\pi(n_j - ik_j)d_j}{\lambda} \quad (4)$$

Em que:

δ_j = fator de fase da camada j ;

d_j = espessura física da camada j ;

λ = comprimento de onda;

Calcula-se o fator de fase δ_j de cada camada, utilizando a equação (4), então determina-se a “matriz característica” de cada camada, presente na equação (2).

³ O índice de extinção k denota a presença de absorção.

Tendo as matrizes de todas as camadas, determina-se o campo elétrico normalizado B e campo magnético normalizado C utilizando a equação (2). Agora pode-se determinar a transmitância T do filtro, usando a equação (5).

$$T = \frac{4y_0 \operatorname{Re}(y_{\text{sub}})}{(y_0 B + C)(y_0 B + C)^*} \quad (5)$$

Em que:

T = transmitância do filtro;

y_0 = admitância do meio incidente, no caso, o ar;

$\operatorname{Re}()$ = parte real de um número;

y_{sub} = admitância do substrato;

A tela gerada pelo simulador pode ser vista na figura 15.

Figura 15: Tela de teste do simulador de crescimento de filme.

O simulador calcula o espectro de transmitância de um filtro desde a primeira até a última camada, aumentando a espessura do filme passo a passo. Todo o equacionamento para determinação da transmitância de um filtro óptico de filmes finos foi implementado, e seus resultados foram comparados com o espectro gerado pelo CAD de projeto de filtros “Essential MacLeod”, da empresa Thin Film Center Inc. (2010). Detalhes deste CAD são apresentados no Anexo A.

O simulador desenvolvido apresenta uma tela com o espectro final esperado do filtro (azul), o espectro esperado para a camada atual (em fase de deposição), extraído da *runsheets* gerada pelo “Essential MacLeod” (vermelho), o espectro gerado pelo simulador de crescimento de filme (verde) e a transmitância da face posterior do substrato, que não recebe filme e interfere na transmitância total do filtro. A reflexão da face posterior reduz a transmitância total do filtro.

O *software* permite realizar a simulação do crescimento do filme, em modo dinâmico ou estático, com controle de velocidade da simulação, valor do incremento de cada iteração e pausa. Pode-se também selecionar a faixa espectral de interesse. A versão final do *software* permite ainda selecionar o ângulo de incidência. É possível selecionar o projeto que se deseja simular dentre uma série de projetos desenvolvidos. Também é possível selecionar entre considerar ou não a reflexão da face posterior do substrato na simulação. Esta opção é interessante quando se deseja analisar o efeito só do filme ou o resultado geral do filtro completo. Existe ainda a opção de pausar a simulação e entrar manualmente com uma condição específica do crescimento do filme, ou seja, escolher o número da camada e a espessura daquela camada, e o simulador determina a característica espectral naquela condição.

As tabelas de índice de refração dos materiais e substratos foram extraídas do CAD “Essential MacLeod”. O crescimento do filme foi simulado por meio de incrementos de 0.1nm, desde a primeira até a última camada. A cada iteração, a transmitância do filtro é calculada, varrendo-se a faixa de comprimentos de onda desejada a cada 1nm, que no caso apresentado na figura 15 é de 300 a

1100nm. As saídas deste simulador de deposição foram utilizadas como entrada do sistema de monitoramento óptico e controle.

Posteriormente, este simulador foi utilizado em substituição aos dados fornecidos pelo espectrofotômetro durante o processo real de deposição para analisar o desempenho do algoritmo de monitoramento isoladamente.

Nos primeiros testes do algoritmo de monitoramento foram utilizados os dados da *runsheets* gerada pelo CAD “Essential MacLeod”. Após a implementação do simulador de crescimento de filme para realizar os testes do algoritmo de monitoramento de modo independente do processo de aquisição de dados, foram feitas comparações entre o simulador implementado e a *runsheets* gerada pelo CAD. Verificou-se que as respostas de ambos os *softwares* eram muito semelhantes, da ordem de 1%, na faixa espectral utilizada no monitor óptico. Com a confirmação desta semelhança, foi feita uma alteração no *software*, e desta forma não há mais a necessidade utilizar a *runsheets* gerada pelo CAD. Apenas com o projeto do filme e as tabelas de índice de refração dos materiais o próprio *software* gera a *runsheets*, utilizando as rotinas do simulador de crescimento de filme.

3.5 Ângulo de incidência não normal

Outra melhoria implementada no algoritmo foi a inclusão do ângulo de incidência nos cálculos, pois identificou-se durante os testes que o feixe de luz do canhão não incide em ângulo reto no filtro testemunha posicionado na calota. Como o equacionamento originalmente implementado considerava a incidência normal, foi necessário desenvolver uma nova versão de *software*, o que demandou alterações profundas no equacionamento implementado. Estas alterações são necessárias devido aos efeitos de polarização da luz, que ocorrem quando existe incidência não normal. Existem dois tipos de polarização: p e s. Para cada polarização a admitância óptica do meio possui valores diferentes, o que gera uma diferença de característica espectral em

cada polarização. A notação para a admitância óptica deixa de usar o símbolo y (caso de incidência normal) passando para η_p e η_s . Observa-se na implementação da figura 16 que é necessário trabalhar no plano complexo. A parte imaginária dos números representa a absorção dos materiais, parcela da energia que não é nem transmitida nem refletida, mas absorvida pelo material.

Figura 16: Determinação da admitância óptica com polarização s (η_s).

A figura 17 mostra a implementação do cálculo do fator de fase δ para polarização s.

Figura 17: Implementação do cálculo do fator de fase δ para polarização s.

Na figura 18 pode-se ver a implementação do cálculo da matriz característica com polarização s.

Figura 18: Implementação do cálculo da matriz característica para polarização s.

De modo semelhante determina-se a matriz característica para polarização p. Pode-se determinar o valor de transmitância e/ou reflectância em ambas polarizações e calcular uma média, o que de maneira geral representa bem o filtro.

3.6 Processo de aquisição de dados

O espectrofotômetro realiza a tarefa de aquisição de dados e fornece os dados por meio de interface USB. Foi utilizado um conjunto de *drivers* de comunicação do LabView, fornecido pelo fabricante do espectrofotômetro. Alguns parâmetros de aquisição tiveram que ser ajustados, como, por exemplo, o tempo de integração, que é o tempo de amostragem dos sensores do CCD. Este parâmetro foi ajustado para 15ms, de modo a haver tempo de amostragem suficiente para adquirir dados espectrais do filtro testemunha com a calota em movimento.

3.7 Algoritmo de sincronização *sensorless* da posição do filtro na calota

Este subitem detalha o algoritmo de sincronização desenvolvido com o intuito de eliminar os sensores de posição da calota, simplificando o sistema de monitoramento.

3.7.1 Funcionamento do algoritmo

O sistema de medição permanece o tempo todo realizando aquisição de dados e processamento do espectro. O sistema de controle da evaporadora mantém a calota em movimento giratório. Como o feixe de luz permanece estático e o filtro testemunha submetido ao processo de deposição de filmes se movimenta

junto com a calota, é necessário identificar o instante em que o filtro passa pelo feixe de luz, de modo a permitir que os dados adquiridos pelo espectrofotômetro sejam considerados válidos para o monitoramento. Além disso, a posição da calota onde ocorre passagem direta da luz ($T=100\%$), utilizada para calibração periódica do sistema de medição da transmitância também deve ser identificada, para validação dos dados e posterior correção do espectro. Os sistemas comerciais utilizam um dispositivo físico detector de posição, um para detectar o ponto onde está o filtro e outro para detectar o ponto de referência $T=100\%$. Para simplificar o sistema de monitoramento aqui proposto, foi desenvolvido um algoritmo especial que dispensa estes sensores. Este algoritmo também é baseado na comparação por figura de mérito. O algoritmo procura permanentemente por três situações pré-definidas, nas quais os dados fornecidos pelo espectrofotômetro são considerados válidos: escuridão total, iluminação plena e filtro. O algoritmo precisa ser alimentado com a informação espectral para que memorize o que deve ser considerado válido em cada uma destas situações. Foi também implementado um sistema de confirmação para identificação da posição $T=100\%$ e posição “filtro”, de modo que elas somente são identificadas efetivamente quando ocorrerem três aquisições de dados espectrais, em seqüência, cujos perfis se enquadram naquela categoria. Este tipo de confirmação diminui a probabilidade de que espectros espúrios acabem sendo validados indevidamente pelo sistema.

3.7.2 Inicialização do algoritmo

Antes de iniciar o processo de deposição, é necessário indicar para o computador quais são as condições iniciais do filtro, da condição de iluminação plena ($T=100\%$) e a condição de escuridão total ($T=0\%$). Posiciona-se a calota em cada uma das condições e deve-se indicar para o computador cada uma delas. Neste momento, o algoritmo armazena o espectro na memória, e aquele perfil espectral passa a ser considerado o conjunto de valores válidos de comparação. Pode-se também realizar esta operação após iniciado o processo, quando o algoritmo procura automaticamente por estas condições, a partir de

um conjunto de regras predefinido. Sabendo-se o período de giro da calota, o algoritmo aguarda em torno de quatro segundos, realiza uma busca pelos espectros que mais se adequam às três categorias, ou seja:

- Escuro total: condição de menor média do espectro encontrada;
- Iluminação plena ($T=100\%$): condição de maior média do espectro encontrada;
- Filtro: condição espectral mais próxima da esperada de um substrato sem filme.

Em caso de perda de sincronismo, pode-se permitir que o sistema entre automaticamente no processo de ressincronização.

Caso o sistema perca o sincronismo, o algoritmo aumenta automaticamente a janela de aceitação (descrita no subitem 3.8.2), de modo a encontrar mais facilmente os pontos que foram perdidos. Como esta é uma condição de exceção, a abertura da janela de aceitação impõe ao sistema um maior risco de detecção errônea e maior exposição à entrada de ruídos.

3.7.3 Filtragem de dados pelo “método do candidato”

Para aceitação efetiva dos dados da condição $T=100\%$ para correção do espectro de transmitância, foi desenvolvido um processo de filtragem, aqui chamado de “método do candidato”. Quando o sistema identifica a posição da iluminação plena, os dados do espectro capturado são armazenados, mas não utilizados para correção imediata. Este espectro armazenado tem, portanto, o *status* de “candidato”. Para que esteja apto a pertencer a esta classe, o espectro é comparado por meio da figura de mérito, e um determinado valor de *threshold* é definido. Caso a figura de mérito tenha um valor abaixo deste *threshold*, o espectro passa a pertencer à classe de candidato a referência. O espectro de referência atual é continuamente comparado com o candidato atual, também por meio de figura de mérito. Mas nesta comparação o critério é invertido, ou seja, caso a figura de mérito calculada entre a referência atual

tenha um valor acima de um determinado *threshold*, então dizemos que “o candidato foi eleito”. O espectro de referência é atualizado e a partir de então a transmitância do filtro passa a ser calculada em relação a uma nova condição de iluminação. Em outras palavras, o sistema é recalibrado.

O espectrofotômetro fornece o perfil espectral em unidade de contagens de intensidade de energia capturada pelos *pixels* do CCD. Para determinar a transmitância do filtro utiliza-se a equação (6).

$$T(\lambda) = \frac{S(\lambda) - D(\lambda)}{R(\lambda) - D(\lambda)} \quad (6)$$

Em que:

$T(\lambda)$ = Transmitância do filtro no comprimento de onda λ ;

$S(\lambda)$ = *Sample intensity* (intensidade de sinal de luz da amostra) no comprimento de onda λ ;

$D(\lambda)$ = *Dark intensity* (intensidade de sinal no escuro) no comprimento de onda λ ;

$R(\lambda)$ = *Reference intensity* (intensidade de sinal da referência de luz 100%) no comprimento de onda λ ;

λ = comprimento de onda;

O *software* permite alterar o tempo de integração do espectrofotômetro, habilitar ou não a auto-ressincronização em caso de perda sincronismo, o valor do *threshold* para captura do candidato, captura do filtro e atualização da referência.

3.7.4 Testes de desempenho

Foram realizados testes em diversas situações, variando-se as condições de iluminação. Utilizou-se uma lâmpada halógena com controle de intensidade, simulando a luz gerada do feixe de elétrons e de uma fonte de plasma. A condição de iluminação foi controlada com variações diversas de intensidade.

Para realização dos testes do algoritmo de sincronização foi utilizado um suporte que simula a calota. Este suporte possui movimento giratório, que auxiliou no desenvolvimento do algoritmo. O dispositivo de testes pode ser visto na figura 19.

Figura 19: Dispositivo para testes do algoritmo de sincronismo *sensorless*.

A figura 20 apresenta os detalhes do espectrofotômetro portátil utilizado, com fibra óptica e o cabo da interface USB conectados.

Figura 20: Detalhe do espectrofotômetro utilizado.

3.8 Proteções contra ruídos de iluminação

Durante os testes do sistema de sincronização da calota foram identificadas algumas situações nas quais ocorreu perda de sincronismo, principalmente devido à identificação incorreta da referência 100% ou do filtro. A causa principal da identificação incorreta é o ruído luminoso, gerado pelas reflexões aleatórias da calota em movimento. Desta forma, diversas proteções contra os ruídos de iluminação foram implementadas, descritas a seguir.

3.8.1 Tempo mínimo para identificar a referência

Após uma identificação da referência $T=100\%$, o algoritmo suspende a aceitação de novos candidatos por alguns segundos, pois esta posição da calota só deve aparecer após uma volta completa da calota. Como a velocidade da calota é em torno de 20RPM, o tempo de uma volta completa é em torno de 3 segundos. Deste modo, foi considerado um valor de 2.5 segundos para esta proteção.

3.8.2 Janela de tempo para aceitação do filtro testemunha

Período de tempo no qual o sistema está habilitado para aceitar a detecção do filtro testemunha. Quando a referência $T=100\%$ é detectada, o sistema abre uma janela de tempo para atualizar o espectro de transmitância do filtro. Se o filtro testemunha é detectado durante esta janela de tempo, o espectro de transmitância é atualizado. Quando a janela de tempo é fechada, o espectro do filtro não será atualizado, mesmo se o filtro testemunha for detectado. Foi considerado um tempo de 1.0 segundo para esta proteção.

3.8.3 Tempo máximo para identificação da referência $T=100\%$

Após a identificação da referência $T=100\%$, é estipulado um tempo máximo no qual deve ocorrer uma nova identificação. Caso a identificação não ocorra dentro do tempo estipulado, considera-se que a referência foi perdida. O valor do *threshold* é automaticamente multiplicado por um parâmetro chamado “*Lost reference factor*” para aumentar a janela de aceitação. Esta situação pode ocorrer no caso de alteração abrupta na condição de iluminação. Para definir o valor desta proteção, considerou-se o tempo para garantir duas voltas completas da calota, resultando em 10 segundos. O valor do multiplicador *Lost*

reference factor foi ajustado para 3.0, sendo determinado empiricamente durante o processo de deposição efetiva de filmes.

3.8.4 Tempo máximo para identificação do filtro testemunha

Tem função semelhante à proteção anterior, mas neste caso é relativo ao filtro testemunha. Também foi ajustado para 10 segundos. Para esta proteção o multiplicador do *threshold* foi chamado de “*Resynchronization factor*”, e ajustado para um valor de 1.5. Este valor também foi determinado empiricamente.

3.9 Correção dos índices de refração com a temperatura

Observou-se durante os ensaios efetivos na câmara da evaporadora um aumento da energia captada pelo espectrofotômetro durante o processo de realização do vácuo. Este fenômeno é atribuído à diminuição no índice de refração do ar quando em condições de pressão muito baixa (da ordem de 10^{-5} mbar). Além disso, observou-se que durante o processo de deposição o índice de refração dos materiais que compõem os filmes muda em função da temperatura de maneira significativa. Estes fenômenos causaram alterações profundas nas medições realizadas. As variações nas medições causadas pela pressão baixa podem ser facilmente corrigidas realizando a calibração da referência $T=100\%$. Mas a correção das medições em função da variação do índice de refração dos materiais dos filmes e do substrato causadas pela elevação da temperatura é uma ação de maior complexidade.

Os efeitos do vácuo e pressão de oxigênio sobre o índice de refração foram analisados e descritos por Schmitt, Borgogno e Pelletier (1986) nos materiais TiO_2 e SiO_2 . Outros estudos similares são apresentados por Takashashi (1995).

As primeiras tentativas de realizar a correção do índice de refração dos materiais com a temperatura foram por meio de dados tabelados e equações obtidas de diversas fontes, entre elas: Gorachand (1998), Wiechmann e Müller (2006), Xie, Zeng e Yeo (2008), Bass (2010) e Wakaki, Kudo e Shibuva (2007). Verificou-se que os modelos e tabelas apresentados por estas fontes não se adequaram aos espectros apresentados pelos filmes em processo de deposição. Chegou-se à conclusão de que seria necessário realizar ensaios para a determinação dos índices de refração na condição real de deposição dos filmes, pois os modelos e tabelas da literatura não se aplicam aos materiais quando submetidos a tais condições.

3.9.1 Simulador de filme de camada única

Para auxiliar nos ensaios de determinação das tabelas de índice de refração dos materiais quando submetidos ao processo de evaporação/deposição, foi desenvolvido um *software* que determina o espectro teórico de um filme de camada única, quando depositado em apenas uma face do substrato. Este simulador ajuda a definir quais espessuras de filmes serão utilizadas nos ensaios de temperatura. O *software* calcula a característica de transmitância esperada (à temperatura ambiente) a partir da tabela de índice de refração do material do filme, do substrato e da espessura do filme. A figura 21 mostra a tela gerada por este simulador.

Figura 21: Tela do *software* auxiliar para determinação de índices de refração.

É possível selecionar o material do filme, o material do substrato, a espessura do filme, o ângulo de incidência e a faixa espectral desejada. O *software* calcula a transmitância total para um substrato com apenas uma camada de filme depositado (gráfico em verde), a transmitância total do substrato sem filme considerando as duas interfaces vidro/ar (gráfico em amarelo) e a transmitância referente a uma única interface vidro/ar do substrato sem filme (gráfico em vermelho). O *software* possui bancos de dados referentes ao índice de refração do material do filme (gráfico em magenta) e do índice de refração do substrato (gráfico em azul). Pode-se ver também no lado inferior direito um campo para estimar a transmitância de cada interface do filtro a partir das medições realizadas nos corpos de prova utilizados nos ensaios.

3.9.2 Estimativa de índices de refração pelo método de Swanepoel

Um método utilizado para estimar índice de refração e espessura de filmes é baseado no trabalho de Swanepoel (1983). Baseia-se na extração de diversas informações existentes no espectro de transmitância de um substrato, primeiramente sem filme depositado, e depois com apenas uma camada de filme depositado, do material que se deseja analisar (TiO_2 , SiO_2 , etc). A espessura da camada de filme deve ser selecionada de modo que gere uma característica espectral com número suficiente de harmônicos para a análise, dentro da faixa espectral de interesse. As informações extraídas da curva de transmitância são:

- Transmitância do substrato sem filme (T_s); com isso é possível determinar o índice de refração do substrato;
- Comprimento de onda de cada ponto de inflexão;
- Transmitância de cada ponto de máximo (T_M);
- Transmitância de cada ponto de mínimo (T_m);
- Envelope (envoltória da curva de transmitância) de T_M e T_m ;

É um método simples e eficaz, e realiza duas iterações, que buscam minimizar o erro. Também é possível determinar o valor da espessura física d da camada de filme, também por processo iterativo. Primeiramente, o algoritmo realiza uma estimativa do índice de refração do substrato a partir da transmitância total medida do substrato sem filme, utilizando a equação (7).

$$s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\frac{1}{T_s^2} - 1} \quad (7)$$

Em que:

s = índice de refração do substrato;

T_s = Transmitância total do substrato sem filme;

Esta equação utiliza a transmitância total medida, que inclui o efeito das duas interfaces ar/substrato. Para determinar a transmitância de apenas uma

interface ar/substrato, utiliza-se a equação (8). Considera-se um substrato não absorvente.

$$T_{isf} = \frac{2T_s}{T_s + 1} \quad (8)$$

Em que:

T_{isf} = Transmitância de uma interface do substrato sem filme;

Utilizando os pontos de inflexão do espectro de transmitância medido, é traçado um envelope da curva com duas funções imaginárias, sendo uma delas formada pelos pontos de máximo (T_M) e outra formada pelos pontos de mínimo (T_m).

Pode-se agora utilizar a equação (9) para obter o valor da grandeza auxiliar N .

$$N(\lambda) = \frac{2s(T_M(\lambda) - T_m(\lambda))}{T_M(\lambda) * T_m(\lambda)} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (9)$$

Em que:

$N(\lambda)$ = variável auxiliar;

$T_M(\lambda)$ = Transmitância máxima (curva envoltória máxima);

$T_m(\lambda)$ = Transmitância mínima (curva envoltória mínima);

Obtido o valor da variável auxiliar N , calcula-se a primeira estimativa do índice de refração do material do filme (n_1), utilizando a equação (10).

$$n_1(\lambda) = \sqrt{N(\lambda) + \sqrt{N(\lambda)^2 - s^2}} \quad (10)$$

Em que:

$n_1(\lambda)$ = primeira estimativa do índice de refração do material do filme;

Tendo-se agora o valor de n_1 , calcula-se a primeira estimativa da espessura física do filme (d_1), utilizando a equação (11). Para esta estimativa, utilizam-se dois pontos de máximo ou mínimo consecutivos.

$$d_1 = \frac{L_1 * L_2}{2(L_1 * n_2 - L_2 * n_1)} \quad (11)$$

Em que:

d_1 = primeira estimativa da espessura física do filme;

L_1 = comprimento de onda do ponto de inflexão nº 1;

L_2 = comprimento de onda do ponto de inflexão nº 2;

n_1 = índice de refração no comprimento de onda L_1 ;

n_2 = índice de refração no comprimento de onda L_2 ;

Combinando os pontos de inflexão consecutivos dois a dois, obtém-se uma tabela de estimativas de espessura d_1 . Pode-se agora extrair a média dos valores de d_1 para obter um único valor estimado de d_1 .

Agora utiliza-se a equação (12) para determinar o número de cada harmônico. Esta equação indica os comprimentos de onda onde ocorrem os pontos de inflexão (pontos extremos) da curva de transmitância.

$$m\lambda = 2nd \quad (12)$$

Em que:

m = número inteiro se for ponto de máximo ou número inteiro mais 0,5 se for ponto de mínimo;

λ = comprimento de onda (nm);

n = índice de refração do material do filme;

d = espessura física da camada (nm); utilizar o valor médio d_1 ;

Determinados os valores de m , utiliza-se a mesma equação (12), e obtém-se uma tabela da segunda estimativa da espessura d_2 em função de λ . Calculando

a média de d_2 , tem-se a estimativa final da espessura física. Utiliza-se novamente a equação (12) para realizar a estimativa final da tabela de índice de refração n_2 do material do filme.

A figura 22 mostra a tela do *software* implementado com o método de Swanepoel.

Figura 22: Tela do *software* com o método de Swanepoel implementado. O *software* realiza as estimativas de espessura e índice de refração e gera a curva de transmitância a partir destas estimativas.

Para verificar a correção deste método, foi utilizado no mesmo *software* o algoritmo das matrizes características que determinam a transmitância de um filme de material n e espessura d , depositado sobre um substrato s . O *software* gera a curva de transmitância apresentada na figura 22 a partir da espessura e da tabela de índice de refração estimados pelo algoritmo de Swanepoel. O

algoritmo implementado foi testado com a mesma curva de transmitância utilizada pelo autor do método. Esta curva é apresentada na figura 23.

Figura 23: Curva de transmitância de um filme de camada única fabricado com material de índice de refração e espessura conhecidos.

Fonte: Swanepoel (1983)

Os dados desta curva foram submetidos ao algoritmo implementado, o qual realizou a estimativa de espessura e gerou a tabela de índice de refração do material.

3.9.3 Estimativa de índices de refração com o *software* PUMA

O método de Swanepoel possui um sério inconveniente, pois para produzir um número suficiente de harmônicos (no mínimo cinco), a espessura mínima da camada deve ser relativamente grande. Para o caso do material SiO_2 , esta espessura é de 700nm. Como as espessuras utilizadas nos filtros em geral se encontram na faixa de 10 a 400nm, os erros nos índices de refração causados pela diferença de espessura são relevantes. Devido a este inconveniente, procurou-se identificar um outro método alternativo que não apresentasse esta limitação. Deste modo, foi identificado o método da minimização irrestrita, proposto por Birgin, Chambouleyron e Martínez (1999). A implementação deste método gerou um *software* chamado *Pointwise Unconstrained Minimization Approach* (PUMA). É um *software* de código aberto, desenvolvido em linguagem C, e que pode ser baixado gratuitamente no *website* do Instituto de Matemática e Estatística da USP (Instituto de Matemática e Estatística-USP, 2011). Este *software* permite extrair informações de um filme de camada única de qualquer espessura depositado em um substrato com índice de refração conhecido. O *software* tem como entrada os dados de transmitância dentro da faixa espectral de interesse. A saída do *software* é uma tabela de índice de refração estimada do material do filme, uma tabela do índice de extinção do filme, além da estimativa da espessura da camada. O algoritmo busca a minimização do erro quadrático da curva de transmitância, variando a espessura e índice de refração, dentro de restrições fornecidas pelo usuário referentes à faixa de espessura e índice de refração. O algoritmo pode ser executado em três etapas, sendo que em cada uma delas pode-se restringir ainda mais as estimativas iniciais, inclusive diminuir o erro quadrático mínimo desejado.

Como o *software* PUMA é executado em linha de comando do sistema operacional e possui diversos parâmetros, foi desenvolvida uma interface com o usuário em LabView, para facilitar o trabalho de chamadas ao *software*. A figura 24 mostra a tela da interface desenvolvida.

Figura 24: Tela da interface com o usuário desenvolvida para simplificar a utilização do *software* PUMA.

Uma vez adquiridos os dados espectrais de transmitância ao final da deposição efetiva de filme de camada única numa determinada temperatura, submete-se a curva de transmitância ao *software* PUMA. Deste modo é possível identificar as alterações de índice de refração e índice de extinção causadas pelo aumento de temperatura e vácuo.

Para realizar testes de desempenho do *software* PUMA, foram geradas curvas de transmitância de filmes de camada única com diversos materiais e

espessuras utilizando-se o CAD “Essential MacLeod”. Estas curvas foram submetidas ao *software* PUMA para realizar estimativas de espessura e índice de refração do material do filme. Um dos filmes analisados é composto por uma camada de 1000nm de TiO_2 depositado sobre vidro N-BK7, do fabricante Schott (2010). O espectro teórico gerado por este filme está mostrado na figura 25.

Figura 25: Espectro de transmitância gerado pelo CAD “Essential MacLeod” para um filme de camada única de 1000nm de TiO_2 sobre vidro N-BK7.

As estimativas realizadas pelo *software* PUMA referentes a este filme são apresentadas no capítulo 4.

3.10 Arquitetura de *software*

Devido à complexidade do sistema, as rotinas foram desenvolvidas utilizando uma arquitetura baseada nos princípios de modularidade e reutilização de código. Utilizou-se a plataforma LabView devido à facilidade de programação, ferramentas nativas de *debug* da linguagem, migração direta dos protótipos para aplicação real, e familiaridade com o ambiente de desenvolvimento.

Todas as rotinas foram implementadas como subvi's⁴, que correspondem a blocos modulares de *software*. Houve a preocupação de se implementar blocos de concepção mais simples possível, possibilitando sua reutilização em aplicações futuras.

A própria interface gráfica de programação da plataforma LabView facilita o entendimento do fluxo de dados e da arquitetura de *software* utilizada, funcionando também como documentação gerada enquanto se implementam os algoritmos.

3.11 Método utilizado para o desenvolvimento do *software*

O desenvolvimento das rotinas foi realizado com base no Modelo de Métodos Ágeis, sendo implementadas funcionalidades em curtos períodos de tempo, por poucas pessoas, testadas e corrigidas logo em seguida. Uma vez implementada a funcionalidade, a versão foi congelada e documentada. Partiu-se então para a implementação de uma outra funcionalidade, adicionada à versão anterior. Gerou-se uma nova versão com o mini-incremento da nova funcionalidade, que foi então testada e corrigida, se necessário. (Pressman, 2006)

Pelo fato de ser um modelo baseado no ciclo de desenvolvimento incremental e iterativo, o Modelo de Métodos Ágeis permite fazer alterações nos requisitos conforme os resultados dos testes de cada versão, e o desenvolvimento se adapta a estas mudanças.

A cada versão gerada e testada, um novo ciclo de desenvolvimento de *software* foi iniciado. O fato de se ter utilizado a plataforma LabView, linguagem essencialmente gráfica, auxiliou na geração de documentação simplificada para cada mini-incremento gerado.

⁴ Nomenclatura própria da plataforma Labview dada as subrotinas de programação.

A sequência de implementação de funcionalidades foi a seguinte:

- Módulo para determinação da característica espectral de um filtro de filmes finos multicamadas;
- Simulador de crescimento de filmes finos;
- Sistemas de arquivos e bancos de dados dos índices de refração dos materiais, substratos, projetos de filtros e *runsheets* geradas pelo CAD de projetos de filtros;
- Módulo de controle, com determinação da figura de mérito;
- Inclusão dos sistemas de proteção (*timeout*, convergência);
- Algoritmo de sincronização da calota;
- Inclusão dos filtros digitais de dados;
- Funções de resincronização em caso de perda de sincronismo;
- Inclusão do ângulo de incidência nos algoritmos;
- *Softwares* de correção dos índices de refração com temperatura.

Cada módulo desenvolvido foi testado de modo independente, sendo então adicionado ao projeto. Além disso, a cada nova funcionalidade adicionada, diversos testes de integração foram realizados. Cada versão de *software* gerada foi submetida a testes funcionais, tanto com simulação de crescimento quanto com deposição efetiva de filmes.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações e ensaios com deposição efetiva de filmes realizados com os algoritmos do monitor e testes dos *softwares* de extração de características ópticas.

4.1 Simulador de crescimento de filmes

Diversos projetos foram submetidos ao simulador de filmes e os resultados de transmitância por ele apresentados tiveram uma média de 1% de erro (na faixa de 350 a 1100nm) quando comparados ao CAD “Essential MacLeod”. As curvas geradas pelo simulador e pelo CAD para um filme de 28 camadas podem ser visualizadas na figura 26.

Figura 26: Comparação do simulador (traçado em azul) com o *software* de projeto de filtros “Essential MacLeod” (traçado em vermelho).

Com base nos resultados destes testes, o algoritmo de simulação foi considerado válido para utilização como entrada do algoritmo de

monitoramento, em substituição aos dados fornecidos pelo espectrofotômetro durante a deposição efetiva de filmes.

4.2 Introdução de erros nos índices de refração

Utilizando a função que introduz erros nos índices de refração, foram realizados diversos testes simulados. Os erros introduzidos correspondem a alterações geradas por falhas de deposição, que causam variação de densidade do filme. Observou-se que os filtros com filmes finos são pouco tolerantes a variações no índice de refração dos materiais. Variações acima de 2% em um dos materiais geraram grande impacto nas características parciais e finais dos filtros simulados. Por outro lado, foram bem aceitas variações iguais de até 5% em ambos os materiais. A figura 27 mostra o resultado de uma simulação onde foi introduzida variação de -5% no índice de refração em ambos os materiais comparado com o espectro esperado.

Figura 27: Introdução de variação fixa de -5% no índice de refração dos dois materiais utilizados na deposição dos filmes (curva em azul). O traçado em vermelho é o espectro esperado, gerado pelo “Essential MacLeod”.

De modo semelhante, foi realizada uma simulação com variação de $\pm 5\%$ no índice de refração em ambos os materiais. A figura 28 mostra o resultado desta simulação comparado com o espectro esperado.

Figura 28: Introdução de variação fixa de $\pm 5\%$ no índice de refração dos dois materiais utilizados na deposição dos filmes (curva em azul). O traçado em vermelho é o espectro esperado, gerado pelo “Essential MacLeod”.

4.3 Algoritmo de sincronização *sensorless*

Os testes em bancada do algoritmo de sincronização com a simulação de ruídos luminosos mostraram que o sistema é confiável, pois em nenhum momento houve perda de sincronismo após o ajuste dos *thresholds*.

Durante os ensaios realizados na evaporadora, ocorreu perda de sincronismo logo no início do processo de realização do vácuo, devido ao aumento abrupto de transmitância gerado pela diminuição do índice de refração do ar rarefeito. Este problema foi resolvido com a inclusão da função de auto-ressincronização, realizada com a câmara já em vácuo.

A figura 29 mostra uma tela com os dados coletados do espectrofotômetro (gráfico em vermelho), o espectro do candidato a referência (em verde), a referência propriamente dita (em amarelo), o espectro de transmitância do filtro (em azul) e os *status* do algoritmo de sincronização.

Figura 29: Tela do *software* de aquisição de dados espectrais e algoritmo de sincronização.

4.4 Algoritmo de monitoramento

Este subitem apresenta os resultados dos testes de desempenho realizados com o algoritmo de monitoramento e controle da deposição.

4.4.1 Utilização de dados gerados pelo simulador de crescimento de filmes

Ensaio do algoritmo de monitoramento realizados com o simulador de crescimento de filme em substituição aos dados fornecidos pelo espectrofotômetro mostraram que o método automático de finalização das camadas pela identificação do ponto de mínimo da figura de mérito é eficiente. Esta análise se mostrou fundamental para a continuidade do desenvolvimento. Diversos projetos de filtros foram utilizados no simulador, e as respostas do monitor foram consideradas satisfatórias. Como ilustração, a figura 30 mostra uma tela parcial, onde o crescimento de um filme de 28 camadas é simulado passo a passo.

Figura 30: Transmitância de um filtro durante a deposição simulada do filme, comparada ao valor teórico esperado ao final da camada.

É possível verificar que erros ocorridos em determinadas camadas pelos mais diversos motivos, como variação do índice de refração dos materiais, erros de medição, erros de cálculos, etc, são minimizados durante a deposição de outras camadas, pois o sistema não se preocupa propriamente com a

espessura, mas sim com a característica espectral. Durante o processo de deposição, o sistema constrói uma tabela com a espessura estimada de cada camada, baseando-se no tempo e na taxa de deposição.

4.4.2 Monitoramento de deposição efetiva de filmes

Após a instalação do sistema na evaporadora, procedeu-se aos testes preliminares e ajustes de parâmetros. O algoritmo de monitoramento foi submetido a testes de fabricação de filmes de poucas camadas. Foram identificadas diferenças entre o resultado esperado e o efetivo obtido durante o processo de deposição. Como pode ser visto na figura 31, existe uma influência das condições de temperatura e pressão da câmara, tanto sobre o índice de refração do TiO_2 quanto do substrato de vidro N-BK7.

Figura 31: Monitoramento da deposição efetiva de um filme de camada única de TiO_2 com 500nm de espessura.

Pode-se verificar no gráfico superior à esquerda da figura 31 que existe uma diferença considerável entre o espectro esperado (vermelho) e o espectro efetivo (azul) durante a deposição de um filme de camada única de TiO_2 , com 500nm de espessura, tanto em termos de amplitude da transmitância quanto em termos da localização dos pontos de inflexão (harmônicos).

4.5 Estimativa de índice de refração com o método de Swanepoel

Os dados da curva de transmitância apresentada na figura 23 foram submetidos ao algoritmo implementado, o qual realizou uma estimativa de espessura e gerou uma tabela de índice de refração do material. A curva de transmitância gerada a partir destas estimativas está mostrada na figura 32.

Figura 32: Curva gerada a partir das estimativas de espessura e tabela de índice de refração realizadas pelo algoritmo de Swanepoel.

A curva gerada apresentou características de pontos de máximo e mínimo com erro menor que 0,1% em termos de comprimento de onda, e menor que 1% em termos de transmitância, quando comparadas com a curva original. Os valores da tabela de índice de refração gerada apresentaram erros da ordem de 1% em relação aos valores das tabelas padronizadas.

4.6 Estimativa de índice de refração com o *software* PUMA

Os valores de índice de refração e espessura estimados pelo *software* PUMA a partir da curva de transmitância de um filme de camada única de 1000nm de TiO_2 sobre vidro comum foram comparados aos dados da tabela de índice de refração do CAD “Essential MacLeod”. O PUMA estimou a espessura em 995nm, o que significa um erro de -0,5%. A tabela estimada de índice de refração apresentou um erro médio de +0,46%. Estes desvios são considerados baixos e não têm impacto representativo nas curvas espectrais dos filtros.

5. CONCLUSÕES

Durante a montagem do sistema na evaporadora ocorreram diversos efeitos indesejados, como vibração mecânica, ruído elétrico, problemas de alinhamento óptico, que foram tratados caso a caso. Mas o efeito que teve mais impacto e que está gerando mais esforço para adequação é, sem dúvida, a compensação do índice de refração dos materiais em função da temperatura. Esperava-se de antemão que a temperatura teria influência nos índices de refração, mas não que seria tão importante. Para realizar a correção, serão necessários ensaios completos dos materiais dos filmes nas condições reais da evaporadora. Sabe-se que o índice de refração destes materiais também varia em função da espessura de filme depositado, portanto o plano de ensaios deve considerar a deposição de filmes de várias espessuras.

Os modelos encontrados na literatura para realizar a correção do índice de refração dos materiais com a temperatura não foram capazes de explicar o comportamento óptico apresentado pelos filtros durante o processo de deposição. As diferenças encontradas entre as tabelas padronizadas e os resultados práticos obtidos se devem ao fato destas tabelas serem obtidas por meio de ensaios com materiais em estrutura física *bulk* (cristais de estado sólido), diferentemente da estrutura do material durante sua solidificação sobre o substrato no processo de deposição. A microestrutura dos materiais e outros fatores que afetam o comportamento óptico dos filmes finos são discutidos por Macleod (2001).

Os resultados obtidos das estimativas de grandezas ópticas realizadas pelo algoritmo de Swanepoel foram considerados adequados, pois atendem aos requisitos de precisão para o índice de refração. A principal restrição para a utilização deste algoritmo é o número mínimo de cinco harmônicos que a característica espectral do filme de camada única deve apresentar. Para que apresente este número de harmônicos, a camada deve possuir espessura maior que 100nm. É bastante comum que filtros de filmes finos possuam

camadas com espessuras menores que 100nm, o que inviabiliza a utilização deste algoritmo para realizar a correção do índice de refração.

Os testes realizados com o *software* PUMA para extração de características ópticas também produziram resultados adequados, quando o *software* foi submetido às curvas espectrais geradas pelo CAD de projetos “Essential MacLeod”. Ao contrário do algoritmo de Swanepoel, o PUMA realiza boas estimativas mesmo para espessuras menores que 100nm, muito comuns em filtros de filmes finos.

Os ensaios dos materiais de filmes finos devem ser realizados com temperaturas de até 230°C. Os resultados destes ensaios devem ser incluídos no algoritmo de controle da deposição para correção dos índices de refração.

Um efeito em particular que poderia ter influência no sistema de monitoramento é o da luz emitida pelo material fundente do cadinho. Trata-se de uma fonte de luz de alta intensidade, não tem perfil constante, além de possuir distribuição espectral não-homogênea. Mas, na prática, não teve influência considerável.

Outro ponto importante é a proteção dos dispositivos posicionados na parte interna da câmara de evaporação, para que não ocorresse deposição de filme em regiões indesejadas, como o coletor de luz e as lentes do canhão. O sistema projetado funcionou adequadamente. Optou-se por colocar uma janela extra de quartzo de sacrifício, para garantir que o material evaporado não se depositasse sobre a lente colimadora do sistema de coleta de luz.

Testes realizados com o simulador de crescimento de filme desenvolvido a partir do equacionamento de filtros com filmes finos multicamadas demonstraram que seus erros podem ser considerados desprezíveis, quando seus resultados foram comparados ao CAD de projeto de filtros “Essential MacLeod”. O desenvolvimento do simulador de crescimento de filmes foi de fundamental importância para realizar as análises e testes do algoritmo de monitoramento. Além disso, o algoritmo do simulador permitiu a eliminação da etapa de geração da *runsheet* pelo CAD “Essential MacLeod” e também da

necessidade da leitura do arquivo de dados da *runsheet* pelo algoritmo de monitoramento. Isto foi considerado um grande ganho no processo, simplificando ainda mais a utilização do monitor óptico.

O algoritmo de controle da deposição foi exercitado com o auxílio do simulador de crescimento de filme, em substituição ao sinal fornecido pelo espectrofotômetro. As simulações mostraram que o método automático de finalização das camadas pela identificação do ponto de mínimo da figura de mérito, utilizando a primeira derivada, é eficiente. Esta análise se mostrou fundamental para a continuidade do desenvolvimento.

Foram realizadas também simulações da variação do índice de refração dos materiais. Verificou-se que os filtros de filmes finos multicamadas aceitam muito bem variações de até 5%, iguais para ambos os materiais. Esta tolerância dos filtros quanto à variação nos índices de refração só é possível devido ao princípio de funcionamento do monitor óptico banda larga. Como o sistema procura minimizar os erros por meio da medição da característica espectral, as espessuras efetivamente depositadas acabam tendo uma diferença em relação ao projeto teórico, de modo a compensar a diferença existente entre o índice de refração efetivo e o teórico. Por outro lado, os filtros não aceitam variações maiores que 2% em apenas um dos materiais. Para estes casos, a característica espectral final gerada foi insatisfatória.

O sistema de sincronização *sensoless* da calota, baseado na comparação espectral por meio de figura de mérito e na filtragem de dados pelo “método do candidato”, mostrou ser confiável. Esta conclusão se baseou nos resultados de diversos testes de aplicação de filmes. Com relação ao algoritmo de auto-ressincronização, diversos testes foram realizados forçando artificialmente a perda de sincronismo, além de testes com deposição efetiva de filmes. O sistema foi capaz de se recuperar automaticamente em todas as vezes que ocorreu perda de sincronismo durante os testes realizados. O sistema de sincronização permite a eliminação de sensores de posição, o que é um fator que ajuda a reduzir o custo final e simplifica a instalação do equipamento.

Durante o desenvolvimento foi possível identificar o grande potencial do sistema de monitoramento óptico para trazer melhorias significativas ao processo de fabricação de filtros de filmes finos multicamadas. O processo de deposição poderá se tornar mais previsível, passando a ser mais controlado e com repetibilidade superior ao processo baseado na medição com cristal ressonante. O monitoramento óptico banda larga permite ainda identificar anomalias na característica espectral do filme em deposição, de modo a ser possível intervir no processo de evaporação durante sua realização para as correções devidas, diminuindo assim as perdas.

A limitação da faixa espectral da fonte de luz utilizada no desenvolvimento e a baixa sensibilidade do espectrofotômetro na faixa acima dos 800nm prejudicaram o desempenho do algoritmo de monitoramento. Além disso, não permitiu a realização adequada da correção dos índices de refração dos materiais. Eliminados os problemas gerados pela variação de índice de refração dos materiais com a temperatura e demais ajustes no algoritmo para realizar a compensação, as variações em termos de comprimento de onda previstas estão dentro de um deslocamento em torno de $\pm 20\text{nm}$, e a variação máxima de transmitância da ordem de $\pm 5\%$, em relação ao projeto completo (teórico), e $\pm 5\text{nm}$ e $\pm 2\%$ camada a camada. Estas variações atendem plenamente aos requisitos exigidos pelos equipamentos que utilizam filtros com tecnologia de filmes finos.

Os resultados gerais obtidos dos ensaios realizados com o sistema desenvolvido indicam a possibilidade de se construir um sistema de monitoramento com equipamentos optoeletrônicos de baixo custo, quando comparados aos sistemas de monitoramento óptico banda larga disponíveis no mercado.

6. PROPOSTAS PARA MELHORIAS FUTURAS

É de fundamental importância para a continuidade do desenvolvimento do monitor a utilização de uma fonte de luz com maior intensidade na região espectral entre 300 e 450nm. Existem fontes de luz adequadas para esta aplicação disponíveis comercialmente. Este tipo de fonte de luz é composto por duas lâmpadas, uma de deutério para faixa de ultravioleta (300 a 450nm) e outra de tungstênio para a faixa de luz visível (450 a 700nm) e parte do infravermelho próximo (de 700 a 1100nm). Também é necessário utilizar outro espectrofotômetro com maior sensibilidade na faixa espectral acima de 800nm. Uma opção alternativa é utilizar dois espectrofômetros, sendo cada um deles responsável pela medição de faixas distintas do espectro. Os ensaios para compensação dos índices de refração dos materiais com temperatura devem ser realizados com a nova configuração de fonte de luz e espectrofotômetro.

Outra melhoria está relacionada à integração dos sistemas. Por motivos de simplificação e praticidade para o operador, o sistema de controle original e o sistema de monitoramento óptico precisam ser integrados em um *software* único. Na condição atual, o projeto do filtro deve ser informado tanto ao sistema original quanto ao monitor. Existem ainda algoritmos para compensação de erros que podem ser implementados, baseados nos trabalhos de diversos autores, apresentados a seguir como sugestões para melhoria do sistema de monitoramento.

6.1.1 Método de pré-tratamento de MacLeod e Pelletier (1977)

Utilização de corpos de prova com um *pre-coating*, para melhorar o contraste entre os espectros apresentados por camadas consecutivas, o que resulta em aumento da precisão na identificação do ponto de término de deposição de cada camada.

6.1.2 Método de recálculo *online* de Vidal e Pelletier (1979b)

Alteração da espessura das camadas por meio de recálculo online, em função do comportamento óptico apresentado durante a deposição, de modo a corrigir o espectro.

6.1.3 Método de Tikhonravov, Trubetskov e Amotchkina (2006)

Análise pré-produção, para identificar falhas potenciais causadas por alta sensibilidade em determinadas camadas do filtro.

6.1.4 Método de Zhupanov et al. (2009)

Utilização de vários corpos de prova, expostos um a um à deposição de filmes, por meio de um carrossel. A seqüência de exposição é estrategicamente definida antes do início da deposição, de modo que o contraste espectral entre as camadas é maximizado, aumentando a precisão do processo.

REFERÊNCIAS⁵

BADOIL, B., LEMARCHAND, F., CATHELINAUD, M., LEQUIME, M. (2007). Interest of broadband Optical monitoring for Thin-film Filter Manufacturing. *Appl. Opt.*, Vol. 46, No. 20, pp. 4294-4303.

BASS, M. (2010). **Handbook of Optics, Vol. IV, Third Edition**. McGraw-Hill.

BIRGIN, E., CHAMBOULEYRON, I., MARTÍNEZ, J. (1999). Estimation of the optical constants and the thickness of thin films using unconstrained optimization. *Journal of Computational Physics* 151, pp. 862-880.

Cerac Inc. Sobre materiais para deposição de filmes. *Site da Cerac Inc.* [Online] 15 de novembro de 2010. [Citado em: 15 de novembro de 2010.] <http://www.cerac.com/products/evaporat.htm>.

Dassault Systèmes. Sobre o *software* SolidWorks. *Site da Dassault Systèmes.* [Online] 19 de outubro de 2010. [Citado em: 27 de outubro de 2010.] <http://www.solidworks.com/>.

Don Co. LTD. Sobre materiais para deposição de filmes. *Site da Don Co., Ltd.* [Online] 15 de novembro de 2010. [Citado em: 15 de novembro de 2010.] <http://www.don21c.com/>.

GORACHAND, G., (1998). **Handbook of Thermo-Optical Materials with Applications**, Academic Press.

Instituto de Matemática e Estatística-USP. Sobre o *software*: PUMA. *Site do Instituto de Matemática e Estatística da USP.* [Online] 25 de novembro de 2010. [Citado em 21 de janeiro de 2011.] <http://www.ime.usp.br/~egbirgin/puma/>.

⁵ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR6023.

Inficon. Sobre o monitor de frequência para medição de espessura de filmes. *Site da Inficon.* [Online] 19 de outubro de 2010. [Citado em 27 de outubro de 2010.] <http://www.inficonthinfilmdposition.com/>.

Journal of Instrumentation. Sobre o artigo submetido: "SENSORLESS SYNCHRONIZATION METHOD FOR THIN FILM DIRECT OPTICAL BROADBAND MONITORING SYSTEM". *Site do JInst.* [Online] 17 de novembro de 2010. [Citado em 27 de janeiro de 2011.] <http://jinst.sissa.it/jinst/>.

MACLEOD, H.A., (1972). Turning Value Monitoring of Narrow-Band All-Dielectric Thin-Film Optical Filter, *Opt. Acta* 19, No. 1, pp.1.

MACLEOD, H. A., PELLETIER, E., (1977). Error compensation mechanisms in some thin-film monitoring systems. *Optica Acta*, 24, pp. 907-930.

MACLEOD, H.A., (2001). **Thin-film Optical Filters**, Third Edition, Institute of Physics Publishing, London.

MACLEOD, H.A., (2004). Tutorial on Optical Coating Design. Training course presentation.

MARTINS, A.L., RODRIGUES, E.L.L., (2010). Sistema de baixo custo para monitoramento óptico banda larga, em tempo real, para fabricação de filtros com filmes finos multicamadas. CBA2010.

OnLink Technologies. Sobre o monitor óptico OMD-8000. *Site da OnLink Technologies.* [Online] 19 de outubro de 2010. [Citado em: 27 de outubro de 2010.] <http://www.onlink.de/>.

PRESSMAN, R.S., (2006). **Engenharia de software**, 6ª edição, McGraw-Hill, Brasil.

SCHMITT, B., BORGOGNO, J.P., PELLETIER E., (1986). In situ and air index measurements: influence of the deposition parameters on the shift of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Appl. Optics, Vol. 25, pp. 3909-3915.

Schott Inc. Sobre o vidro N-BK7. Site da Schott. [Online] 29 de outubro de 2010. [Citado em 29 de outubro de 2010.] <http://www.us.schott.com/>.

SWANEPOEL, R., (1983). Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. J. Phys. E: Sci.Instrum., Vol. 16, pp. 1214-1222.

TAKASHASHI, H., (1995). Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition. Appl. Optics, Vol. 34, pp. 667-675.

Thin Film Center Inc. Sobre o *software* Essential MacLeod. Site da Thin Film Center. [Online] 19 de outubro de 2010. [Citado em 27 de outubro de 2010.] <http://www.thinfilmcenter.com/>.

TIKHONRAVOV, A. V., TRUBETSKOV, M. K., AMOTCHKINA, T.V. (2006). Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production by broadband optical monitoring. Appl. Optics 45, pp. 7026-7034.

Umicore. Sobre materiais para deposição de filmes. Site da Umicore. [Online] 15 de novembro de 2010. [Citado em: 15 de novembro de 2010.] <http://www.thinfilmpproducts.umicore.com/>.

VAN DER LAAN, C. J. (1986). Optical monitoring of nonquarterwave stacks. Appl. Optics 25, pp. 753-760.

VIDAL, B., FORNIER, A., PELLETIER, E. (1978). Optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters. Appl. Optics 17, pp. 1038-1047.

VIDAL, B., PELLETIER, E. (1979a). Wideband optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters. Appl. Optics 18, pp. 3851-3856.

VIDAL, B., PELLETIER, E. (1979b). Nonquarterwave multilayer filters: optical monitoring with a minicomputer allowing correction of thickness errors. *Appl. Optics* 18, pp. 3857-3862.

WAKAKI, M, KUDO, K., SHIBUVA, T. (2007). **Physical Properties and Data of Optical Materials**, CRC Press.

WIECHMANN, S., MÜLLER, J. (2006). Thermo-optic properties of TiO_2 , TaO_5 and Al_2O_3 thin films for integrated optics on silicon. Elsevier B.V. *Thin Solid Films*, pp. 6847-6849.

XIE, H., ZENG, T., YEO, W.K., (2008). Temperature dependent properties of titanium oxide thin films by spectroscopic ellipsometry. *SIMTech*, V9, pp. 29-32.

ZHUPANOV, V.G., KLYUEV, E.V., ALEKSEEV S.V., KOZLOV, I. V., TRUBETSKOV, M. K., KOKAREV, M. A., TIKHONRAVOV, A. V. (2009). Indirect broadband optical monitoring with Multiple Witness Substrates, *Appl. Opt.* Vol. 4B, No. 12 , pp. 2315-2320.

Zemax Development Corporation. Sobre o *software*: Zemax. *Site da Zemax Development Corporation*. [Online] 19 de outubro de 2010. [Citado em 27 de outubro de 2010.] <http://www.zemax.com/>.

APÊNDICE A - Projeto óptico e mecânico do canhão de luz

Apresentam-se aqui os detalhes do projeto óptico e mecânico do canhão de luz e sua fixação sob a câmara de evaporação.

O projeto óptico do canhão de luz foi desenvolvido utilizando-se uma ferramenta CAD chamada Zemax, desenvolvido pela “Zemax Development Corporation” (2010). Este CAD permite analisar o comportamento dos raios luminosos em um sistema composto por lentes e demais componentes ópticos. Um desenho de raios do projeto óptico gerado pelo Zemax para o canhão de luz está mostrado na figura 33.

Figura 33: Projeto óptico do canhão de luz utilizando CAD Zemax.

O projeto mecânico foi realizado com o CAD SolidWorks, desenvolvido pela “Dassault Systèmes” (2010). A figura 34 apresenta uma tela do CAD SolidWorks, com o sistema completo modelado.

Figura 34: Canhão de luz com ajuste de foco e suporte com ajuste de alinhamento do feixe.

Pode-se notar na figura 34 três molas de aço que suportam o sistema, utilizadas para realizar o alinhamento do feixe de luz gerado pelo canhão, além de diminuir a vibração mecânica transmitida ao canhão.

A figura 35 apresenta o canhão e suporte montados, numa vista superior em perspectiva de dentro da câmara.

Figura 35: Montagem do canhão de luz na parte inferior da câmara.

Observa-se na figura 35 uma série de furos na chapa inferior da câmara de evaporação, que são originais do equipamento. Estes furos são fechados com pequenas tampas parafusadas, dotadas de *o-rings* (anéis de borracha) especiais para vácuo. Os furos são previstos para permitir a instalação de equipamentos opcionais e fixação de instrumentos e dispositivos adicionais. O projeto do sistema de fixação do canhão utilizou alguns destes furos originais.

Para que a luz do canhão entrasse na câmara pela parte inferior, foi colocada uma janela de quartzo em um dos furos originais da câmara do equipamento, com sistema de vedação adequado para trabalhar em condição de alto vácuo. O motivo de se utilizar o quartzo para fabricação da janela é que ele apresenta alta transmitância e resposta homogênea na faixa espectral utilizada pelo monitor (300 a 1100nm).

A figura 36 mostra uma foto do canhão e suporte fabricados, montados em uma bancada de testes.

Figura 36: O canhão de luz montado sobre uma bancada de testes.

APÊNDICE B - Sistema de coleta de luz

O Sistema de coleta de luz é composto pelos seguintes dispositivos:

- Mecanismo de posicionamento;
- Dispositivo de proteção contra deposição de filme (armadilha de filme);
- Janela de proteção de quartzo;
- Prisma para desvio do feixe;
- Lente colimadora;
- Fibra óptica interna especial para suportar altas temperaturas;
- Passador de vácuo para fibras ópticas;
- Fibra óptica externa banda larga;

A armadilha de filme tem a função de evitar que a nuvem de material evaporado atinja a lente colimadora e o prisma desviador de feixe. É composta por um cilindro com uma série de anéis, formando um labirinto para a nuvem de partículas. As partículas se depositam nas paredes internas do cilindro e sobre os anéis, antes de atingir o prisma e a lente colimadora. O sistema foi projetado para desmontagem simplificada, para limpeza periódica do filme depositado nas paredes da armadilha de filme e troca da janela de quartzo, caso necessário.

O feixe de luz passa por um furo da armadilha de filme, então é desviado pelo prisma, depois é coletado pela lente colimadora. Uma fibra óptica especial para altas temperaturas é conectada à lente colimadora, conduzindo o feixe até um passador de vácuo, que transmite o feixe de luz para fora da câmara. Na parte externa da câmara existe outra fibra óptica que guia o feixe de luz até ser aplicado ao espectrofotômetro. A figura 37 apresenta o caminho percorrido pelo feixe de luz no sistema de coleta.

Figura 37: Diagrama do caminho percorrido pelo feixe de luz no sistema de coleta.

A armadilha de filme também tem a função de evitar que outras fontes de luz atinjam a lente colimadora e seja captada pelo espectrofotômetro. Estas perturbações luminosas podem ser causadas por: feixe de elétrons; material fundente dos cadinhos; reflexões internas da câmara. O sistema mecânico possui um ajuste de alinhamento de modo que seja possível captar o máximo de luz, aumentando a sensibilidade do sistema. O projeto mecânico do sistema de coleta de luz está mostrado na figura 38.

Figura 38: Projeto mecânico do sistema de coleta do feixe de luz. Possui sistema de ajuste para alinhar a lente colimadora com o feixe de luz que atravessa o filtro testemunha.

ANEXO A - Projeto de filtros de filmes finos multicamadas

Para auxiliar o projeto dos filtros utiliza-se uma ferramenta CAD específica para filtros com filmes finos. Este tipo de CAD possui tabelas de índice de refração de diversos materiais utilizados em filmes finos, algoritmos para síntese de filtros, simuladores de desempenho e diversas ferramentas de otimização que auxiliam o projeto. O CAD utilizado neste trabalho é o “Essential MacLeod”, da empresa Thin Film Center Inc. (2010) mostrado na figura 39.

Figura 39: Tela do CAD "Essential MacLeod".

Na tela do CAD pode-se notar uma janela com os *targets* do filtro, ou seja, qual a característica óptica desejada ao longo dos comprimentos de onda. Quando se deseja realizar a síntese de um filtro, é necessário detalhar o espectro

esperado, em termos do perfil de transmitância, reflectância ou absorção. Também é necessário definir os materiais a serem utilizados, selecionados a partir de uma tabela de materiais, além de uma série de outros parâmetros, como material do substrato, ângulo de incidência, polarização, espessura mínima e máxima das camadas, densidade dos materiais, e muitos outros. A figura 40 mostra a janela com a lista de *targets*, onde se definem os requisitos do filtro.

	Wavelength (nm)	Operator	Required Value	Target Tolerance	Type
	1010,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1015,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1020,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1025,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1030,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1035,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1040,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1045,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1050,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1055,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1060,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1065,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1070,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1075,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1080,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1085,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1090,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1095,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
	1100,00	=	0,000000	1,000000	Transmittance (%)
*					

Figura 40: Janela com a lista de *targets* do espectro final desejado.

O usuário define qual o valor de transmitância, reflectância e/ou absorção nos comprimentos de onda de interesse, tolerância desejável, além do peso (nível de importância relativa) de cada requisito. Esta tabela será a entrada para os algoritmos de síntese.

Uma outra janela com o projeto do filtro é mostrada pelo CAD, onde se encontram o número de camadas, o material e a espessura de cada camada, o material do substrato, etc. Esta janela é apresentada na figura 41.

Blocking Filter						
Design Context Notes						
Incident Angle (deg)			0,00			
Reference Wavelength (nm)			600,00			
	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FwOT)	Physical Thickness (nm)
▶	Substrate	N-ZK7	1,50798	0,00001		
	1	TiO2	2,29175	0,00000	0,08278697	21,67
	2	SiO2	1,45808	0,00000	0,13132692	54,04
	3	TiO2	2,29175	0,00000	0,11754718	30,77
	4	SiO2	1,45808	0,00000	0,19963041	82,15
	5	TiO2	2,29175	0,00000	0,07639171	20,00
	6	SiO2	1,45808	0,00000	0,17521187	72,10
	7	TiO2	2,29175	0,00000	0,17227240	45,10
	8	SiO2	1,45808	0,00000	0,04860252	20,00
	9	TiO2	2,29175	0,00000	0,29057841	76,08
	10	SiO2	1,45808	0,00000	0,09966731	41,01
	11	TiO2	2,29175	0,00000	0,08285506	21,69
	12	SiO2	1,45808	0,00000	0,69355385	285,40
	13	TiO2	2,29175	0,00000	0,07639171	20,00
	14	SiO2	1,45808	0,00000	0,15188892	62,50
	15	TiO2	2,29175	0,00000	0,09549989	25,00
	16	SiO2	1,45808	0,00000	0,55379881	227,89
	17	TiO2	2,29175	0,00000	0,47878515	125,35
	18	SiO2	1,45808	0,00000	0,46949044	193,20
	19	TiO2	2,29175	0,00000	0,45058435	117,97
	20	SiO2	1,45808	0,00000	0,43986655	181,01
	21	TiO2	2,29175	0,00000	0,43251487	113,24
	22	SiO2	1,45808	0,00000	0,44627209	183,64
	23	TiO2	2,29175	0,00000	0,43885379	114,90
	24	SiO2	1,45808	0,00000	0,44103892	181,49
	25	TiO2	2,29175	0,00000	0,43493156	113,87
	26	SiO2	1,45808	0,00000	0,44696507	183,93
	27	TiO2	2,29175	0,00000	0,43521590	113,94
	28	SiO2	1,45808	0,00000	0,43961869	180,90
	29	TiO2	2,29175	0,00000	0,43830320	114,75
	30	SiO2	1,45808	0,00000	0,45389271	186,78
	31	TiO2	2,29175	0,00000	0,45658425	119,54
	32	SiO2	1,45808	0,00000	0,45421424	186,91
	33	TiO2	2,29175	0,00000	0,44318251	116,03
	34	SiO2	1,45808	0,00000	0,21897675	90,11
	Medium	Air	1,00000	0,00000		
					10,86729496	3722,95

Figura 41: Janela do projeto gerado pelo sintetizador do CAD.

Uma vez definido o projeto das camadas, o CAD permite determinar o perfil espectral teórico gerado pelo filtro projetado. A figura 42 apresenta a janela do CAD com o espectro gerado pelo projeto da figura 41.

Figura 42: Tela do CAD com o espectro de transmitância obtido com o projeto gerado pelo sintetizador.

Cabe ao projetista analisar o espectro, aceitar o projeto gerado pelo CAD, alterar as restrições, executar os algoritmos de otimização, permitir ou não a inclusão de novas camadas caso o resultado não atenda os requisitos, alterar materiais, alterar os pesos dos *targets* em determinadas regiões espectrais, realizar simulações de desempenho como, por exemplo, o comportamento com a variação do ângulo de incidência, identificar os impactos gerados por erros de deposição, e também identificar quais camadas são mais determinantes no resultado final do filtro. Além do projeto do filme em si, este CAD pode gerar a *runsheets*, que é utilizada como base de dados teórica do sistema de monitoramento óptico.