

CARACTERIZAÇÃO IN SITU DE FILMES FINOS:  
DEPOSÍMETRO À FIBRA ÓPTICA

W. Guedes, R. Klippert, R. M. Agosto, S. B. Mendes, M. Fin e  
F. Horowitz

Instituto de Física, UFRGS, Campus do Vale, C.P. 15051  
91500 PORTO ALEGRE RS

## 1. RESUMO

Neste artigo é apresentada uma revisão não-exaustiva dos métodos de monitoração de filmes finos para aplicações ópticas, com ênfase na monitoração óptica, suas vantagens e limitações no controle do processo de deposição.

Neste contexto, são relatados os primeiros resultados obtidos no desenvolvimento local de um deposímetro à fibra óptica com comprimento de onda variável, amplificador síncrono com dois canais ativos e divisor analógico de sinais a tolerâncias muito baixas.

Palavras chave: Filmes finos - monitoração - caracterização óptica.

## 1. INTRODUÇÃO

A monitoração de filmes por cristal oscilante de quartzo, talvez por razões históricas, tem dominado quase que totalmente a tecnologia e a produção nacionais de recobrimentos com espessura controlada.

Embora relativamente simples, esta técnica fornece espessuras físicas a partir de incrementos de massa e suposições, geralmente pouco realísticas, sobre a densidade dos filmes.

Uma alternativa aqui considerada é a monitoração baseada na modulação pelo efeito de interferência de um sinal luminoso, refletido ou transmitido por um filme em crescimento, tendo em conta suas interfaces com o substrato e o ambiente circundante. Este método é particularmente apropriado para recobrimentos ópticos, uma vez que seu parâmetro de maior interesse a espessura óptica é monitorada diretamente, mesmo que ocorram variações de densidade, e portanto no índice de refração do material, durante o processo de deposição.

## 2. MONITORAÇÃO ÓPTICA

Os métodos de monitoração óptica podem ser divididos em duas modalidades principais: monitoração direta sobre o sistema mono ou multicamada de interesse, e monitoração indireta sobre lâminas-teste individuais.

O método clássico para monitoração óptica de filmes dielétricos, monitoração por valores extremos ("turning value monitoring") consiste em interromper a deposição das camadas em máximos ou mínimos no sinal de refletância ou transmitância a um comprimento de onda fixo, correspondendo a espessuras ópticas múltiplas de quarto-de-onda.

No caso em que o número de camadas depositadas é suficiente para produzir saturação de sinal, torna-se vantajosa a utilização da monitoração indireta com duas ou mais lâminas-teste. O emprego de lâminas-teste permite a aplicação da monitoração por valores extremos com comprimentos de onda distintos correspondendo a diferentes camadas, que de outra forma não teriam espessuras ópticas múltiplas de um mesmo quarto-de-onda.

Adicionalmente, a monitoração indireta torna-se indispensável na produção em escala de componentes ópticos, ao preço da necessidade de fatores de calibração dependentes de geometria, material, taxa de deposição, etc.

A monitoração direta apresenta a clara vantagem de que a medida é feita no próprio filme multicamada que está sendo depositado. Adicionalmente, ela permite o emprego de mecanismos de compensação de erros em configurações com tolerâncias estreitas.

Um filtro de banda estreita, por exemplo, centrado em 600 nm e com largura a meia altura de 2 nm, requer tolerâncias

individuais em espessura nas suas camadas de 0,3% ou menores [1], quando as margens de erro alcançáveis na prática são pelo menos uma ordem de grandeza maiores [2].

Mesmo assim, filtros como este são realizáveis pela monitoração por valores extremos. Esta meta é possível graças a um significativo processo de compensação, no qual o pequeno erro cometido em uma camada pode ser compensado por desvios correspondentes nas camadas subsequentes.

Sob este aspecto, controlado o crescimento do recobrimento pela performance global das camadas depositadas, a monitoração é denominada composta [3] ou, se sobre uma lâmina-teste em separado, semidireta [1].

Quando os índices do substrato e filme são próximos, implicando numa modulação de sinal com pequena amplitude, um procedimento útil na monitoração indireta é o pré-recobrimento da lâmina-teste com uma camada que aumente o contraste, sem prejuízo do filme de interesse. Este artifício foi estendido para a monitoração semidireta com bons resultados [4], tanto a nível de contraste do sinal, como pela compensação de erros tornada possível [1,5].

Outra tendência de caráter abrangente é o emprego simultâneo de dois [6] ou mais [7] comprimentos de onda na monitoração óptica, acompanhada de simulações por computador da performance desejada para o filme durante seu processo de crescimento [8]. Tradicionalmente, não são considerados, nestas previsões, os desvios de comportamento ideal, incluindo efeitos de anisotropia e inhomogeneidade, sendo este hoje o fator limitante fundamental para o controle da deposição dos filmes [9].

### 3. DESCRIÇÃO DO DEPOSÍMETRO

Com referência à figura 1, o sistema óptico consiste de uma fonte halógena de tungstênio A de 85 W, seguida de uma objetiva B que projeta sua imagem no diafragma D. Este por sua vez, via reflexão no divisor de feixe E e ocular F, tem sua imagem localizada na entrada do fotodetector G, que alimenta o canal-referência do amplificador síncrono.

Por outro lado, o sinal transmitido por E, via H, projeta a imagem de D na entrada I da fibra óptica (montagem otimizada para casamento com o ângulo de aceitação da fibra). O sinal transmitido na saída da fibra J, via K na janela de

entrada para a câmara de vácuo, tem imagem projetada na amostra ou lâmina-teste L.

Em regime de refletância, o sinal refletido por L segue o caminho inverso até ser novamente refletido por E com imagem localizada no filtro de banda estreita ou monocromador M (montagem otimizada para casamento com o ângulo de abertura do monocromador, com varredura de 200 a 900 nm), e daí, via ocular N, para a imagem final do fotodetector que alimenta o canal-amostra do amplificador síncrono. (Em regime de transmitância, o sinal transmitido por L é analogamente captado por O via M e N).

Quanto ao amplificador (lock-in), diferentemente dos aparelhos convencionais, este possui dois canais ativos de amplificação com entradas e saídas independentes. Sincronizado ao chopper C para frequências de operação de 5 Hz a 1 kHz o que permite a eliminação de sinais espúrios vindos do ambiente externo, fontes de deposição, etc. ele pode processar as entradas de referência e de amostra com ganhos de 0,125 a 100 e 1 a  $10^7$ , respectivamente, e constante de integração ajustável de 1 a 100 ms. Dois demoduladores síncronos (PSD), independentes, são acionados, ambos sincronizados por uma amostra do canal-referência. Os valores-limite para o canal-amostra de sensibilidade (100 nV), ruído ( $\sim 50\text{nV} / (\text{Hz})^{0.5}$ ), estabilidade (100 ppm/°C) e off-set (-10 V a +10 V) foram estabelecidos para permitir flexibilidade com manutenção da qualidade de performance a baixas intensidades (caso dos recobrimentos anti-reflexão).

Saindo do amplificador síncrono, como mostrados na figura 2, os sinais de referência e de amostra são conduzidos a um divisor analógico, especialmente projetado e calibrado para tolerâncias menores que 1%, mas que as têm demonstrado da ordem de 0,1%. O resultado da divisão, manifestando os valores de refletância ou transmitância buscados, pode então ser transferido a osciloscópio ou registrador gráfico para o acompanhamento do processo de deposição em tempo real.

### 4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Duas dificuldades importantes para a boa performance da monitoração óptica são (i) as consequências de eventuais flutuações na luz emitida pela fonte e (ii) possíveis desvios de um alinhamento mecânico preciso do sistema óptico, causados por deslocamentos e vibrações a que está sujeito.

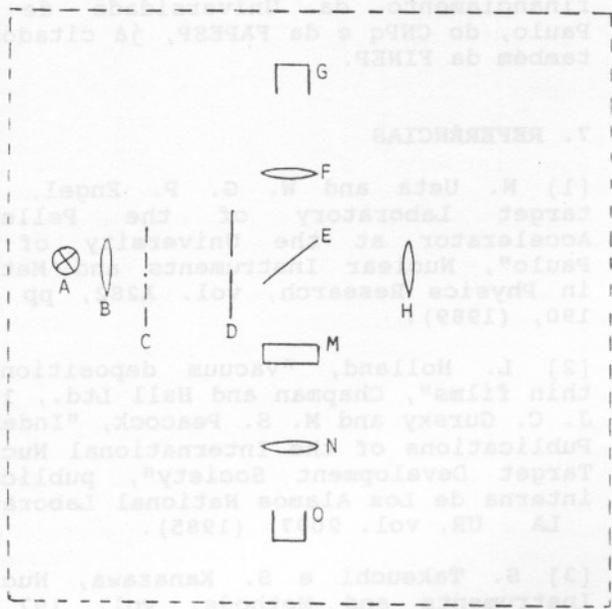


Fig. 1 - Módulo óptico do deposímetro acoplado a evaporador por fibra óptica.



Fig. 2 - Esquema geral do deposímetro, com tratamento de sinais por amplificador síncrono e divisor analógico a tolerâncias da ordem de 0,1%.

## 5. TROCADORES DE CARGA DO FEIXE DE ÍONS

Filmes finos de carbono são utilizados como trocadores de carga ("strippers") do feixe de íons negativos do acelerador Pelletron. A eficiência na troca de carga depende da espessura do filme. Por outro lado, filmes muito finos têm vida curta, o que afeta a eficiência de uso do acelerador. Assim, o trabalho de desenvolvimento de técnicas de fabricação de "strippers" é realizado em diversos laboratórios [3]. O método de fabricação por descarga em hidrocarboneto foi tentado sem sucesso de reprodutibilidade.

O método da evaporação por bombardeamento de elétrons, por focalização eletrostática e por arco de carbono\*\* são os métodos que usamos atualmente na produção dos "strippers". Como substratos, são utilizadas lâminas de vidro polidas e recobertas com uma película de detergente especial, ou de algum sal solúvel em água. Sobre essa superfície é evaporado o filme de carbono, que é posteriormente solto em água e pescado sobre suportes adequados. Esses suportes são montados no terminal de alta tensão do acelerador acoplados a uma esteira rolante que comporta 88 suportes. Verificou-se que a qualidade dos "strippers" depende da uniformidade da película de carbono, que é afetada pela camada solúvel em água, pelas condições de evaporação e o tipo de carbono utilizado. O trabalho de desenvolvimento está em fase de testes de reprodutibilidade da confecção de alguns tipos mais duráveis. Pretende-se dar continuidade ao desenvolvimento do método de evaporação num arco de carbono com potência elétrica substancialmente maior [4].

\*\* Processo FAPESP 85/0390-1

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho vem sendo desenvolvido ao longo dos anos, graças ao financiamento da Universidade de São Paulo, do CNPq e da FAPESP, já citados, e também da FINEP.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] N. Ueta and W. G. P. Engel, "The target Laboratory of the Pelletron Accelerator at the University of São Paulo", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. A282, pp 188-190, (1989).
- [2] L. Holland, "Vacuum deposition of thin films", Chapman and Hall Ltd., 1970; J. C. Gursky and M. S. Peacock, "Index of Publications of the International Nuclear Target Development Society", publicação interna de Los Alamos National Laboratory LA UR, vol. 2097, (1985).
- [3] S. Takeuchi e S. Kanazawa, Nuclear Instruments and Methods, vol. 197, pp 267, (1982); P. Maier-Komor, E. Ranzinger e H. Munzer, Proceedings of The 3rd International Conference on Eletrostatic Accelerator Technology, Oak Ridge, pp 163, (1981); N. R. S. Tait, D. W. L. Tolfree, B. H. Armitage e D. S. Whitmell, Nuclear Instruments and Methods, vol. 167, pp 21, (1979).
- [4] S. Takeuchi and S. Kanazawa, "New carbon stripper foils less Shrinkable under heavy ion bombardeament", Nuclear Instruments and Methods, vol. 206, pp 331-333, (1983); I. Sugai, T. Hattori, H. Muto, Y. Takahashi, H. Kato and K. Yamazaki, "Hybrid-type long-lived carbon stripper foils", Nuclear Instruments and Methods in Physics Resarch, vol. A282, pp 164-268, (1989).

