

Automatização de um Elipsômetro de Zero

Alvaro José Damião, Daniel Fernando Moreira Krabbe, Márcia A. Fogarin Destro

Instituto de Estudos Avançados/CTA - São José dos Campos - SP

Recebido em 30 Agosto, 1999

Elipsometria é uma técnica que permite o estudo das constantes ópticas e da espessura de um filme fino transparente através da alteração do estado de polarização da luz refletida por este filme. É uma técnica bastante sensível às alterações na superfície estudada, como a deposição de algumas camadas atômicas de outro material ou adsorção de um gás, dentre outras. Este trabalho descreve a automatização do processo de medição de um elipsômetro de zero, comercial, operado manualmente, a fim de dispensar a intervenção do operador na execução da medição e de aumentar a exatidão do instrumento. O elipsômetro automatizado foi um Gaertner L-117, com mais de dez anos de uso [1]. O sistema é controlado por um computador pessoal 8086 (clone IBM-XT), com co-processador aritmético. Para a conversão analógico-digital foi utilizada uma placa comercial de 12 bits [2]. A menor divisão de leitura de azimute de polarizador/analizador, que era de 1/10 de grau, passou a 1/400 de grau. O intervalo entre as medições ainda é muito longo devido à utilização do detetor original, que é muito lento para uma aplicação tão exata, levando em média 30 segundos para ter um sinal estabilizado. Para cada par de constantes elipsométricas são buscados mínimos por aproximações lineares e quadráticas, totalizando mais de 200 medições com diferentes azimutes do polarizador e do analisador. Serão apresentados: o esquema do sistema de controle de azimute do polarizador e do analisador, os passos para a aquisição de dados e a descrição do hardware de controle de motores de passo. Serão comentados os dados comparativos obtidos antes e depois da automação para substratos de BK7, bem como resultados de 50 medições (72 horas) consecutivas em um filme de CaF_2 sobre Si.

Ellipsometry is an optical technique that allows the study of optical constants and thin film thickness, through the change of the polarization state when a light beam is reflected by this film. It is a very sensitive technique to any kind of change on the observed surface. This work describes the automation in the measurement process of a commercial null ellipsometer in order to restrict the user's intervention on the measurement and to improve the accuracy of the equipment. A software and hardware description will be presented. The work also shows comments on data obtained before and after automatization, and also the results of 50 measurements (72 hours) of a CaF_2 thin film on Si.

I Introdução

A elipsometria é uma das técnicas de caracterização óptica de superfícies (ou de filmes finos) de crescente utilização. É muito sensível às alterações na superfície ou à deposição de algumas camadas de filme sobre esta superfície. O princípio básico da técnica é a medição da alteração do estado de polarização da luz refletida pela superfície estudada. Para tanto é necessário conhecer o estado de polarização do feixe incidente e do feixe refletido pela amostra.

O elipsômetro mais tradicional é chamado de elipsômetro de zero ("null ellipsometer") e é constituído de uma fonte de luz despolarizada, laser de He-Ne por exemplo, cujo feixe atravessa um polarizador tipo Glan, colocado num azimute conhecido. A seguir o feixe de luz polarizada atravessa uma lâmina de quarto de onda,

gerando um estado de polarização elíptica, que será refletido e modificado pela amostra. Após a reflexão na amostra o feixe atravessa outro polarizador, chamado de analisador, atingindo finalmente o detetor. O que se busca, através da variação do azimute do polarizador e do analisador, é um mínimo (zero) de intensidade no detetor. Isto irá ocorrer quando o feixe que emerge da amostra estiver linearmente polarizado e o analisador estiver cruzado com este estado de polarização. Há portanto duas fases muito importantes na medição, que são: 1) a calibração, que é o estabelecimento dos azimutes relativos entre o polarizador, a lâmina de quarto de onda e o analisador, que é feita durante a fabricação do instrumento; 2) o controle do azimute do polarizador e do analisador durante a medição, que é o objetivo deste trabalho.

Este trabalho descreve a automatização do processo

de medição de um elipsômetro manual L - 117, produzido pela Gaertner em 1980. A automatização teve dois objetivos principais: a) dispensar a presença do operador, que tinha um trabalho determinante, porém tedioso, na qualidade dos resultados; e b) aumentar a exatidão do instrumento que, ao invés do posicionamento do polarizadores e da leitura em um nônio pelo observador, passa a ter controle de azimute através de motores de passo controlados por computador. Cabe esclarecer que a resolução do nônio é de décimo de grau, e que a repetitividade das leituras, quando o equipamento é operado manualmente, é da ordem de $\pm 0,3$ graus.

II Metodologia

Os principais passos da automatização foram:

1. Controle do azimute do polarizador e analisador;
2. Conversão analógica-digital do sinal do detetor;
3. Programação da aquisição de dados

Controle do azimute do polarizador e do analisador

Por se tratar de um elipsômetro comercial, o aparelho já vem calibrado de fábrica, restando ao usuário verificar se os parâmetros da calibração estão corretos. Isto é feito colocando-se o azimute do polarizador exatamente a 135° e buscando a posição de mínimo do analisador. Esta deve ocorrer exatamente a 45° . Caso isto não ocorra é necessário reposicionar o azimute da lâmina de quarto de onda, através dos parafusos de ajuste fino.

O polarizador está montado coaxialmente a um disco graduado (360°), de alumínio, com 170 mm de diâmetro. Como o elipsômetro foi projetado para operação manual havia um anel recartilhado para facilitar o controle do azimute pelo operador; este anel foi substituído por uma coroa dentada com 360 dentes. Esta coroa é movida através de um parafuso-sem-fim, de uma entrada, acoplado a um motor-de-passo. Foi utilizado um motor Singer, SM $1,8^\circ$, acionado por um "driver" de potência, controlado através da saída paralela do computador, utilizando o mesmo princípio de acionamento dos motores de uma impressora. Para uma volta completa do eixo do motor são necessários 200 passos, mas foi utilizado um recurso chamado de meio-passo para aumentar o controle no azimute da rotação. Portanto são necessários 400 passos do motor para que o azimute da coroa seja movido um grau. A rotina do programa de controle do motor faz com que a operação seja executada sempre na mesma direção para evitar a folga da engrenagem ("backlash"). Montagem semelhante foi utilizada para o controle do analisador. O intervalo de tempo entre dois passos do motor é de 7 milissegundos, para não haver perda de passo, que acarretaria uma perda de exatidão do instrumento.

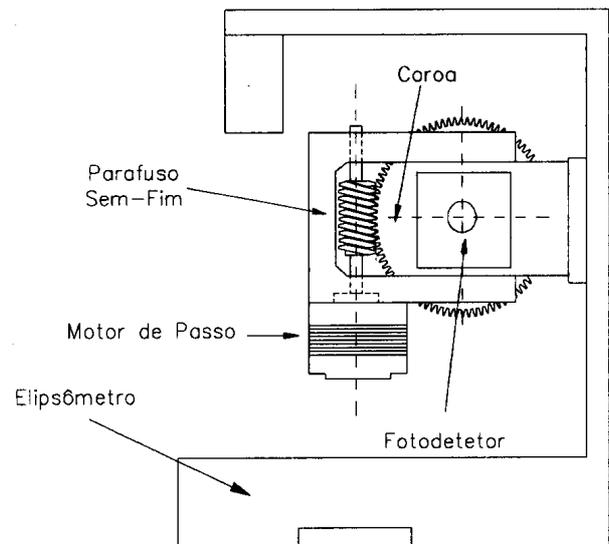


Figura 1. Esquema do controle de azimute do polarizador, descrito no texto.

Conversão analógico-digital do sinal do detetor

O detetor original do equipamento é do tipo resistivo, isto é, a resistência varia de acordo com a intensidade luminosa que atinge o detetor. Como se trata de detetor de baixo ruído sua resposta é bastante lenta, com um tempo de estabilização do sinal de resposta da ordem de 30 segundos. Foram associados em série com o detetor resistivo duas resistências de $5\text{ M}\Omega$ e $1,5\text{ M}\Omega$. Este circuito foi alimentado inicialmente com uma bateria de 6 volts, que a seguir foi substituída por um regulador de tensão 7805. O sinal de saída, obtido entre os terminais do resistor de $1,5\text{ M}\Omega$ alimenta um seguidor de tensão montado a partir de um 741. Isto é necessário para aumentar a impedância da linha, que alimentará o conversor analógico digital. Como a potência dissipada por este circuito é baixa, foi utilizada a fonte de alimentação do próprio elipsômetro, que gera $+15\text{ V}$ e -15 V . A placa de conversão analógica/digital é da LYNX, modelo 12/26, para IBM PC/XT. Foi utilizado o primeiro canal, com entrada diferencial, com varredura entre 0 e 5 volts, que gera dados digitais com valores entre 0 e 511. O sinal de início de conversão é controlado pelo programa de aquisição de dados.

Programação da aquisição de dados

O programa de aquisição de dados controla o azimute do polarizador e do analisador, e envia sinais para conversão de dados. O início da execução do programa é buscar o primeiro mínimo do analisador. A cada 5 graus de azimute do analisador é adquirido um dado; este valor é comparado com o valor obtido anteriormente. Caso seja encontrado um valor maior que o anterior, cuja diferença seja maior que 5 unidades, o ponto anterior era um ponto de mínimo. O analisador assumirá então o azimute correspondente ao valor

de mínimo e o mesmo processo é aplicado ao polarizador. A partir dos dois mínimos iniciais do polarizador e analisador, iniciar-se-á uma busca chamada de linear, onde o intervalo entre azimutes é inicialmente de 1 grau, passando a seguir a 0,5 grau. Para tanto o polarizador volta 3 graus em relação ao mínimo inicial, e nova varredura, de grau em grau, é feita para buscar o azimute de mínimo. A seguir o mesmo é feito com o analisador. Volta-se então o polarizador 1,5 graus e reinicia-se a busca com uma varredura de 0,5 graus. E finalmente o mesmo é feito com o analisador. Termina-se assim a busca chamada de linear, com os azimutes próximos de um mínimo. A seguir, por três vezes para o polarizador e três vezes para o analisador, alternadamente, é feita uma busca chamada quadrática. O nome se deve ao formato da curva formada pelos dados obtidos, que podem ser facilmente ajustados por uma parábola. Através de intervalos sucessivamente menores entre as medições 0,25, 0,125 e 0,065 de grau, seis parábolas são obtidas, cujos valores mínimos são calculados por mínimos quadrados.

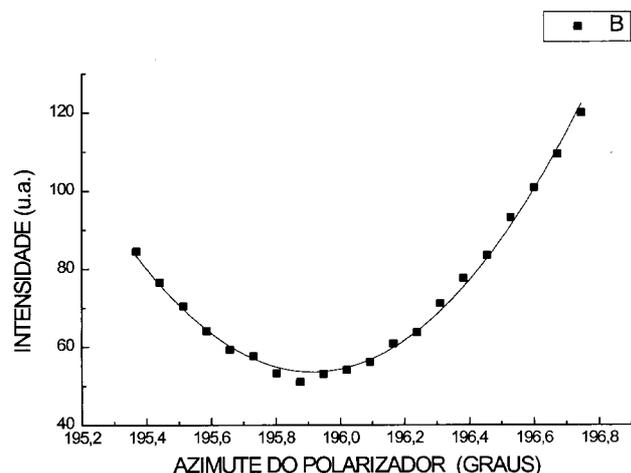


Figura 2. Exemplo de obtenção de mínimo de polarizador, caso quadrático, conforme o texto.

Isto é necessário pois cada mínimo é relativo ao azimute do outro componente óptico, ou seja, quando está sendo movido o analisador o mínimo é relativo a uma certa posição do polarizador e vice-versa; sendo que não necessariamente o outro componente já se encontrava na posição de mínimo absoluto. A partir de três medições para cada um dos componentes não há mudança significativa nos dados. A Fig. 2 mostra sob forma de gráfico a obtenção de um ponto de mínimo do polarizador. O mínimo foi encontrado para um azimute de 195,915 graus.

III Resultados

Os dados podem ser tomados em períodos superiores a 24 horas, sem a necessidade de intervenções do operador, tornando a utilização do equipamento muito mais atraente. A tabela 1 traz o resultado de 50 medições

de um filme de CaF_2 depositado sobre Si. Pode ser observado que há um decréscimo no valor medido para praticamente todos os parâmetros. Isto ocorreu devido a uma falha de um componente da unidade (drive) de potência, que aciona os motores de passo, devido a excesso de temperatura. Isto mostra que, com o aumento da exatidão do instrumento, não só problemas intrínsecos do aparelho podem ser detectados, como problemas devido a automação podem ser facilmente detectados e corrigidos. Neste caso a instalação de um ventilador resolveu o problema. A medição de quatro amostras diferentes levou a valores de índices de refração da ordem de 1,4320 para 633 nm, que são compatíveis com os valores encontrados na literatura [3,4].

Para avaliar o funcionamento do equipamento, uma vez corrigido o problema de superaquecimento, foi escolhido um substrato de vidro BK7. Este material foi escolhido por contar com a maior quantidade de dados antes da automatização. O valor de referência do índice de refração do BK7, para o comprimento de onda (633 nm) é 1,5151. O valor médio obtido de medições anteriores a automação é 1,512. Estas medições anteriores a automação foram realizadas pelo mesmo operador, durante o período de um ano, sobre diferentes substratos de BK7. Os resultados são apresentados na Fig. 3 e a estabilidade dos resultados, no período final de medição, demonstra claramente a evolução do operador em utilizar o elipsômetro. Deve ser observado que a automatização do equipamento evita essa fase de aprendizagem necessária a qualquer operador. A tabela 2 mostra os dados de uma medição realizada com o instrumento automatizado. Trata-se de um substrato de BK7, vidro óptico produzido pela Schott, limpo, sem filme. Foram realizados 50 pares de medições dos azimutes do polarizador (P_1 e P_2) e do analisador (A_1 e A_2). Pode ser observada a estabilidade e repetibilidade da medição.

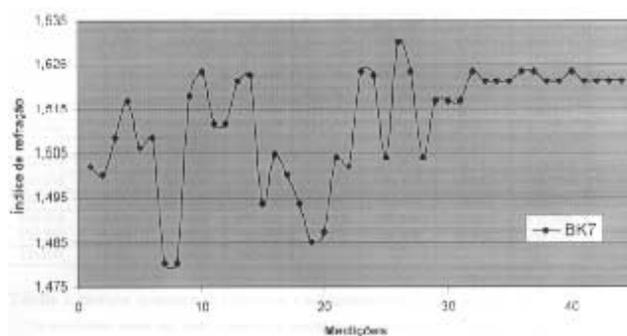


Figura 3. Medições do índice de refração de substratos de BK7, realizadas pelo mesmo operador, durante o período de aproximadamente um ano.

Cada conjunto de dois pares de pontos forma um conjunto completo de uma medição em duas zonas, permitindo a obtenção dos parâmetros elipsométricos. Estes por sua vez, dependendo da superfície estudada

P_1	A_1	P_2	A_2	$P_1 + 180^\circ$	$A_1 + 180^\circ$	$P_2 + 180^\circ$	$A_2 + 180^\circ$
272.738	248.580	184.053	110.515	93.122	69.167	3.838	290.535
272.735	248.460	184.033	110.588	93.172	69.075	3.845	290.553
272.780	248.385	184.040	110.535	93.167	68.960	3.833	290.523
272.738	248.333	184.013	110.510	93.118	68.935	3.730	290.443
272.683	248.280	183.945	110.378	93.113	68.890	3.760	290.350
272.675	248.258	183.978	110.353	93.063	68.845	3.748	290.328
272.678	248.190	183.913	110.343	93.060	68.773	3.720	290.263
272.700	248.153	183.930	110.278	93.093	68.783	3.738	290.203
272.755	248.123	183.855	110.195	93.078	68.760	3.680	290.170
272.663	248.118	183.865	110.180	93.018	68.685	3.658	290.133
272.635	248.035	183.798	110.135	93.023	68.618	3.623	290.050
272.645	247.958	183.820	110.048	93.085	68.515	3.550	289.523
272.783	247.525	183.763	109.245				

Tabela 1. Medições de azimute do polarizador e do analisador para um filme de CaF_2 sobre Si.

P_1	A_1	P_2	A_2	$P_1 + 180^\circ$	$A_1 + 180^\circ$	$P_2 + 180^\circ$	$A_2 + 180^\circ$
135.912	18.983	225.931	338.391	315.754	199.417	45.922	158.777
136.135	19.169	225.980	338.439	315.770	199.438	45.957	158.802
136.142	19.189	225.973	338.430	315.740	199.432	45.927	158.775
136.098	19.169	225.945	338.421	315.703	199.421	45.877	158.777
136.030	19.160	225.891	338.430	315.676	199.418	45.853	158.773
136.046	19.165	225.841	338.415	315.672	199.424	45.819	158.775
136.016	19.166	225.838	338.420	315.656	199.424	45.659	158.658
136.038	19.173	225.758	338.417	315.667	199.424	45.737	158.759
136.025	19.173	225.831	338.428	315.667	199.432	45.821	158.779
136.014	19.173	225.795	338.436	315.666	199.440	45.802	158.786
136.054	19.180	225.850	338.452	315.678	199.450	45.867	158.809
135.730	18.888	225.934	338.477	315.671	199.458	45.870	158.821
136.045	19.203	225.921	338.483				

Tabela 2. Medições de azimute do polarizador e do analisador para um substrato de BK7.

podem fornecer:

1. Superfície limpa (substrato), sem filme: índice de refração (n_s) e coeficiente de absorção (k_s).

2. Substrato (n_s e k_s conhecidos) + filme de uma camada:

- Filme transparente: índice de refração (n_F) e espessura (d_F)

- Filme absorvedor: índice de refração (n_F) e coeficiente de absorção (k_F) ou espessura (d_F)

Deve ser observado que para o filme absorvedor é necessário conhecer um dos três parâmetros por outro método de medição, para que os demais sejam determinados; ou então que a medição seja feita em vários comprimentos de onda e que sejam escolhidos os resultados que apresentem a mesma espessura. Isto porque cada conjunto de medições do elipsômetro fornece um par de parâmetros elipsométricos (Δ e Ψ).

Os parâmetros acima são então computados através do programa estabelecido por McCrackin [6], para comparação com dados de literatura e dados obtidos an-

tes da automação. A Fig. 4 mostra estes resultados. Observa-se que os dados podem ser divididos em dois grupos distintos e bastante repetitivos. Isto se deve a um erro de posicionamento do azimute de um componente óptico (polarizador e/ou analisador), que pode ter se dado por mau uso do elipsômetro ou erro de calibração na fabricação. A simetria de um elipsômetro, em relação ao azimute dos polarizadores, é de 180 graus, ou seja, um mínimo de azimute do polarizador deve ser novamente obtido a 180 graus do anterior. Como pode ser observado na tabela 2, o resultado não se encontra exatamente a 180 graus. Isto pode ser corrigido de três maneiras: a) uma maneira menos elegante, que é tomar a média entre estes valores, supondo que o erro de azimute inicial é compensado na segunda leitura a 180 graus da primeira; b) a mais elegante, que é reposicionar todos os componentes ópticos, o que iniciaria um processo iterativo de medição/desmontagem/remontagem/medição, sem fim, já que os suportes dos polarizadores são manti-

dos em posição por processo de colagem; c) uma maneira mais prática é estabelecer, através de propriedades básicas dos materiais, qual o erro de posicionamento de azimute dos componentes, e subtrair esta quantidade de cada resultado obtido. Isto é obtido através da medição de um filme metálico espesso, dos quais são obtidos os parâmetros de correção, através de rotina proposta por MacCrakin [6]. Neste trabalho optamos pela terceira solução, que nos levou a resultados semelhantes a média das leituras, $n=1,512$.

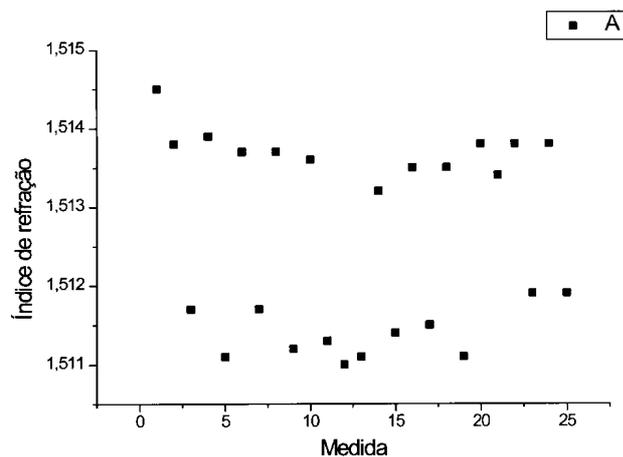


Figura 4. Resultado de 25 medições de índice de refração de um substrato de BK7 limpo, sem filme.

IV Conclusões

Os resultados obtidos mostram grande estabilidade no sistema de medições implantado, com valores compatíveis com a literatura. Houve problemas de ruído, que causam a perda de passos nos motores, devido ao aquecimento de componentes numa medição de longa duração; o que foi corrigido com a instalação de ventilador diretamente na unidade de potência dos motores. Os valores obtidos estão em concordância com os resultados da literatura e demonstram que a automação do equipamento permitiu diminuir a incerteza da medição, além de tornar sua utilização mais confiável por haver menor intervenção do operador.

References

- [1] www.gaertner.com, modelo L-117
- [2] Lynx CaD 12/26.
- [3] P. W. Black and J Wales, *Infrared Physics*, vol.8, 209-222, (1968).
- [4] Crystran, *Optical & Crystals*, edited by Merck, pag. 40, 1991.
- [5] TI - 10, *Technical Information on optical glass*, Schott Glaswerke, Mainz, 1972.
- [6] F. L. McCrakin, "A FORTRAN program for analysis of Ellipsometer Measurements", NBS/RP-479/69, april 1969.