

# Desenvolvimento de sistemas de caracterização óptica de componentes eletro-ópticos

Christiano Pereira Guerra (CTI) e Thebano Emílio de Almeida Santos (CTI)

DINAM - Divisão de Nano, Microssistemas e Materiais  
CTI Renato Archer / MCTI - Campinas/SP

[christiano.guerra@cti.gov.br](mailto:christiano.guerra@cti.gov.br), [thebano.santos@cti.gov.br](mailto:thebano.santos@cti.gov.br)

## Resumo

*As atividades desenvolvidas neste projeto de pesquisa, estão relacionadas à implementação de técnicas de medidas para a caracterização óptica de filmes finos e dispositivos eletro-ópticos. Estas atividades foram desenvolvidas no laboratório de caracterização óptica da antiga Divisão de Mostradores de Informação e contribuem para expandir o espectro de caracterização de filmes finos já existente neste Centro de Tecnologia.*

*Palavras-chave: caracterização óptica, LED, filmes finos, elipsometria, fotometria.*

## 1. Introdução

Este artigo apresenta o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de caracterização das propriedades ópticas de filmes finos e de materiais implementadas à partir de medidas de elipsometria e de medidas de radiometria e colorimetria para caracterização de dispositivos LEDs. Para a obtenção dos parâmetros elipsométricos  $\Psi$  e  $\Delta$ , foi desenvolvido um procedimento específico, procedimento este que muitas vezes são obtidos de forma automatizada. À partir destes parâmetros, a espessura e índice de refração dos filmes finos podem ser estimados com ajuda de programas de simulação numérica. Os resultados obtidos por esta técnica, foram comparados com os resultados de análise realizadas em outros equipamentos de elipsometria para aferição do arranjo experimental escolhido. Adicionalmente, um sistema de caracterização de display SS320 da Microvision, foi reconfigurado de maneira a aproveitar os recursos ópticos e de padrões nele existente para o desenvolvimento de um procedimento para a caracterização de LEDs.

## 2. Metodologia

### 2.1- Elipsometria

A elipsometria é uma técnica usada para medir o estado de polarização da luz após esta trafegar por um meio óptico. A elipsometria usa a propriedade da luz polarizada incidindo obliquamente a uma superfície, causando uma mudança no estado de polarização da luz, após a sua reflexão. O plano de incidência é definido como o plano perpendicular à superfície da amostra e que contém o vetor de direção de propagação da luz. Foi utilizado um laser He-Ne ( $\lambda=6328 \text{ \AA}$ ) como fonte de luz, incidindo na amostra com um ângulo de incidência próximo de  $70^\circ$ . Para definir o estado de polarização linear incidente, um polarizador foi colocado entre o laser e a amostra. Após a reflexão da luz na amostra, um outro polarizador (analisador) é colocado entre amostra e detector, de forma a se obter as medidas de intensidade da luz para ângulos de polarização específicos.

Existem diferentes formas de medir a luz elipticamente polarizada. Neste trabalho optou-se por utilizar a forma mais simples de medida que é a elipsometria fotométrica [TOMPKINS, 2005]. Esta medida consiste em injetar uma luz linearmente polarizada, utilizando um filtro polarizador, com um ângulo azimutal  $\theta$  na superfície S da amostra. A luz refletida torna elipticamente polarizada.

Como forma de facilitar a análise da polarização, inicia-se colocando o polarizador com um ângulo de polarização de  $45^\circ$  [PEDERSEN, 2004] em relação ao plano de incidência da luz. As letras  $p$  e  $s$  na figura 1a identificam a direção de polarização paralela e perpendicular respectivamente ao plano de incidência. A relação básica da elipsometria é dada pela razão entre os coeficientes complexo de reflexão das componentes paralela e perpendicular  $\rho_s$  e  $\rho_p$ , respectivamente.

—

(1)

Os parâmetros elipsométricos  $\Psi$  e  $\Delta$  são obtidos pelas medidas elipsométricas dos dois coeficientes de reflexão e são funções dos índices de refração complexo do material. O ângulo de incidência da luz na amostra  $\Phi$ , é desejável que seja  $70^\circ$  para o tipo de filme analisado, pois corresponde ao mínimo da componente  $p$  [TOMPKINS, 2005]. Como forma de aproveitar a furação já existente na bancada óptica, o ângulo de  $67,5^\circ$  foi escolhido. Um diagrama esquemático da montagem é apresentado na figura 1b.

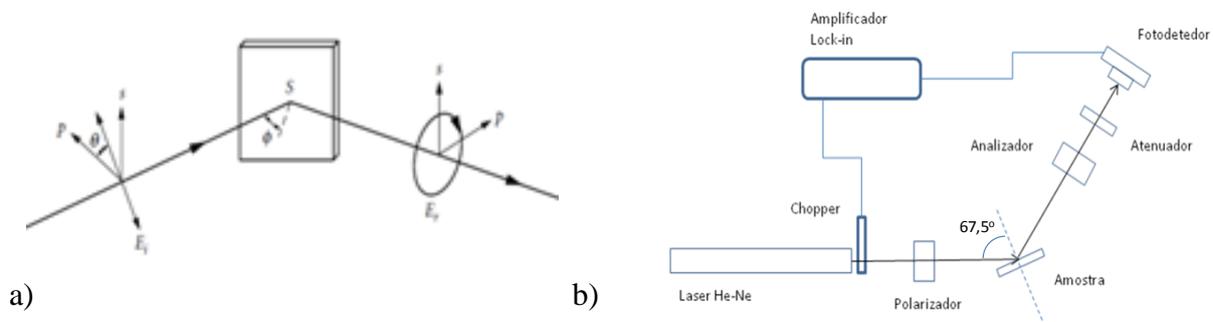


Figura 1- a)- Diagrama esquemático mostrando a incidência da luz na amostra  $S$  e os planos de polarização da luz incidente e refletida na amostra. b)- Diagrama esquemático da montagem óptica usada para medida de elipsometria

As medidas elipsométricas correspondem às intensidades ópticas relativas ao ângulo de referência, com o analisador tendo ângulos de  $0$ ,  $\pi/4$  e  $\pi/2$ . Com o uso destes valores de intensidade e fazendo o uso das equações de Fresnel, é possível então calcular os parâmetros elipsométricos  $\Psi$  e  $\Delta$  [PEDERSEN, 2004]. Para a medição da intensidade da luz, foi utilizado um fotodetector e um sistema de detecção síncrona, com o uso de amplificador *Lock-in* modelo SR510 *Stanford Research Systems* e *Chopper*. O amplificador *lock-in* fornece uma saída DC proporcional ao sinal AC de entrada. O amplificador *lock-In* utiliza a técnica PSD (*phase-sensitive detector*) para extrair a componente do sinal em frequência e fase específica de referência [APPLIED NOTE #3,SRS].

## 2.2- Medidas de fotometria e radiometria

As medidas ópticas de fontes de luz necessitam de cuidados especiais, devido a diferentes intensidades luminosas, distribuições espectrais, grande variação de distribuição espacial de potência. No caso das medidas realizadas em fontes luminosas a base de LEDs ocorrem, outras dificuldades além destas já citadas, devido a grande variedade de encapsulamentos existentes, grande faixa de potencia, além do fato de que os eixos ópticos e geométricos apontarem em diferentes direções. É de grande importância que a caracterização de quantidades fotométricas e radiométricas seja feita de maneira reprodutível em diferentes laboratórios.

A norma CIE 127 [CIE, 2007] recomenda os procedimentos para medida de intensidade radiante, intensidade luminosa, fluxo total e distribuição espectral de potência. Para medidas fotométricas com acurácia é muito importante que o detector tenha uma resposta espectral muito casada com a função  $V(\lambda)$ . Como mostrado na figura 2a, a distância entre o LED e o detector pode ser de 316 mm é denominada condição A, que equivale a um ângulo sólido de 0,001 sr, é mais usado para LEDs com ângulo de emissão mais estreito, menor que  $\pm 20^\circ$ . Se a distância for de 100 mm condição B, que equivale a um ângulo sólido de 0,01 sr. A condição B é a geometria mais usada para LEDs com ângulo mais aberto de emissão.

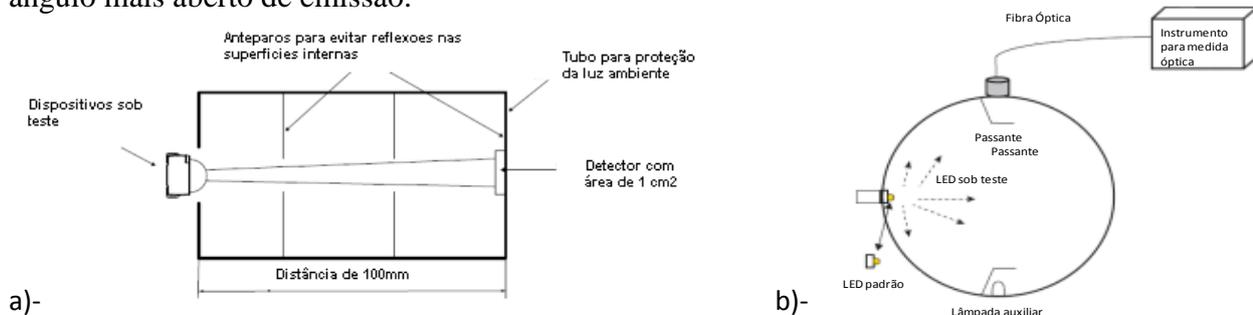


Figura 2- a) Padrão CIE para condições de medição da intensidade luminosa média do LED. b) geometria para medição de fluxo luminoso com o uso de esfera integradora para LEDs sem emissão traseira [AN014, 2018].

Em contraste com a medição de intensidade luminosa, na qual a medição de intensidade da luz passando através de um ângulo estreito, a medição de fluxo luminoso é usado para medir a potência total de luz em todas as direções. A unidade de medida para fluxo luminoso é o Lumen (lm). Esta medição pode ser feita com esfera integradora ou com goniômetro. Com o goniômetro, a intensidade luminosa é registrada em função do ângulo de emissão. Quando o fluxo luminoso for medido com esfera integradora, o dispositivo a ser testado é colocado dentro da esfera oca, na qual a superfície interna é revestida com um material altamente difusor. As múltiplas reflexões criada pela superfície interna, serve para criar a distribuição de iluminação que é proporcional ao fluxo luminoso emitido pelo LED. A dificuldade deste tipo de medição é criar uma calibração específica que se torne necessária para uma medição de precisão e acurácia para os vários tipos de LEDs [NICHIA, 2019]. Uma montagem com esfera integradora de 30 cm de diâmetro, assim também como o método para medir em  $2\pi$ ,  $4\pi$  e fluxo luminoso parcial com o ângulo do cone de luz variável, é descrito [POIKONEM, 2009]. Existe a possibilidade de ser feita uma adaptação para o uso da esfera integradora, que acompanha como acessório, o espectrômetro Perkin Elmer UV-Vis. Esta adaptação ainda será avaliada com critério de acordo com os requisitos geométrico das medições fotométricas e também das dimensões dos componentes.

A luz de saída de um LED é proporcional a corrente direta. Tanto a intensidade de luz emitida quanto a distribuição espectral, dependem da temperatura da junção. O comprimento de onda de pico pode variar entre 0,1 e 0,3 nm para variação de cada grau de temperatura do dispositivo. Para ser feita uma medição calibrada é sugerido o uso de um LED Standart [AN135, 2019], no qual é feito um controle térmico por controlador Peltier com PID, que possui acurácia para a medição de temperatura de  $\pm 0,03^\circ\text{C}$ , uso de uma fonte de corrente constante e um multímetro digital para medição de tensão direta.

Para a medição de resposta espectral, foi utilizado o equipamento Microvision 3200. Este equipamento originalmente é utilizado para se obter os parâmetros ópticos de displays. Ele possui um espectrômetro fotóptico posicionado sobre uma cabeça goniométrica acionada sobre bases de alta precisão permitindo uma leitura de forma automatizada da superfície do display.

### 3- Resultados

#### 3.1- Elipsometria

Para validação da montagem do elipsômetro, foram utilizados três filmes de SiO<sub>2</sub> depositados sobre substrato de Si, que já haviam sido caracterizadas em um equipamento comercial, Acurion Nanofilm EP4. Os resultados comparativos estão apresentados na tabela 1.

Amostra	$\Psi$		$\Delta$		Espessura t (nm)		Índice de refração n	
	Lab CTI	IQ	Lab CTI	IQ	Lab CTI	IQ	Lab CTI	IQ
A	28,9	34,3	98	99,4	73	68,8	1,3	1,4
B	22,5	27	113,3	113,6	51,8	59,2	1,35	1,28
C	50,8	29	88,8	251,4	110	198,2	1,48	1,29

Tabela 1- Medidas comparativas de elipsometria de filmes finos de SiO<sub>2</sub> sobre substrato de silício, realizadas no laboratório de caracterização óptica do CTI e no equipamento comercial Acurion Nanofilm EP4.

#### 3.2- Medidas espectrais

Foram realizadas medidas iniciais que foram utilizadas tanto para realizar a operacionalização do equipamento Microvision, como também estabelecer padrões de medidas para de diferentes tipos de lâmpadas e de dispositivos. O sistema de caracterização de displays poderá ainda ser adaptado para medidas de ângulos de emissão de LEDs, funcionando como minigoniômetro, para isto sendo necessárias algumas adaptações mecânicas. Foram realizadas medidas espectrais de lâmpadas comerciais, com diferentes temperaturas de cores como pode ser visto na figura 3. Estes espectros mostram dispositivos LEDs de vários tipos de fósforo, baseado em fonte de LED azul de InGaN [WANG 2018].

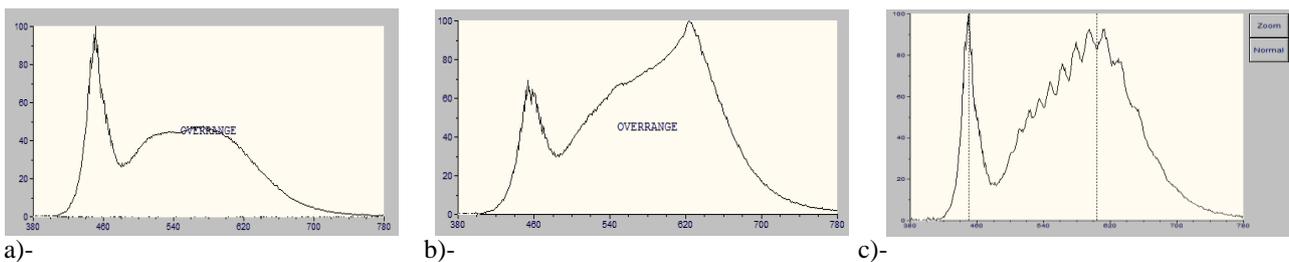


Figura 3- Espectros entre 380 e 780 nm de lâmpadas comerciais de LEDs, a) Lâmpada LED FLC luz do dia 6W. b) Lâmpada LED Osram luz cálida (*warm White LED*) 8W c) Componente unitário de lâmpada LED Osram tubular 20W.

As medidas de luminância e das coordenadas de cromaticidade foram realizadas no equipamento SS320 Microvision. As medidas foram realizadas usando a distância entre as lâmpadas e dispositivos de 100 mm de distância entre a fonte e o detetor. Na figura 4 é mostrado os espectros de uma lâmpada LED RGB, composto de três LEDs independentes. Esta é uma outra estratégia de obtenção de uma fonte de luz branca através de LEDs. Na figura 5 é mostrado no diagrama CIE, as coordenadas x e y obtido dos espectros desta mesma lâmpada.

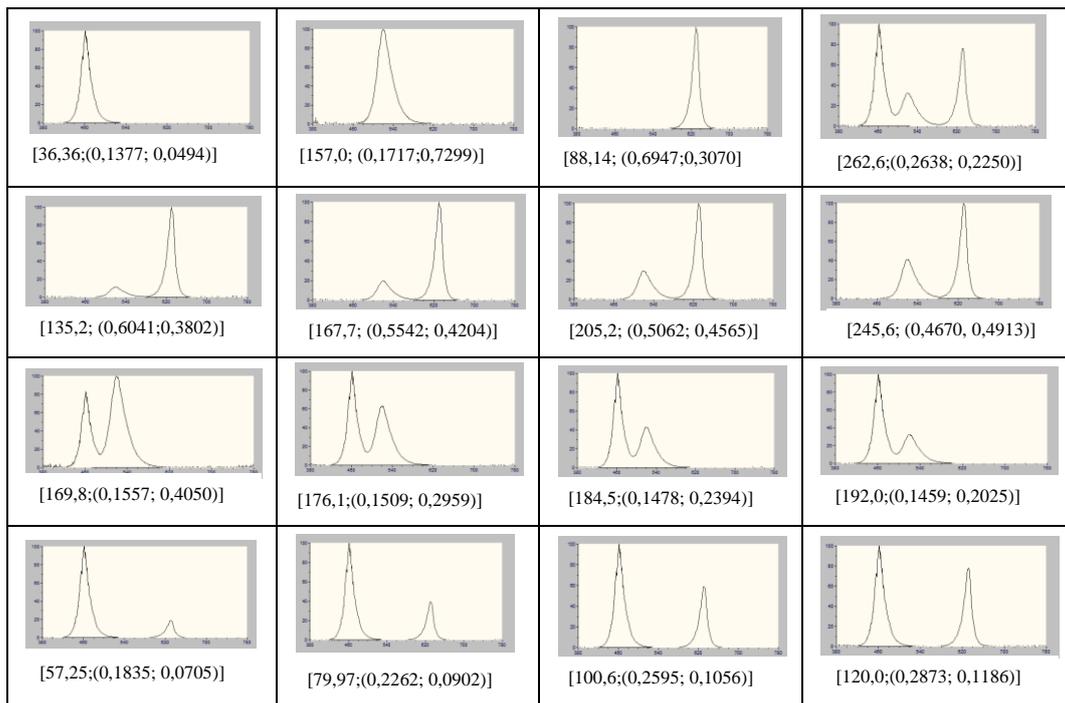


Figura 4- Espectros de lâmpada LED RGB LLUM 5W, Luminância ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) e coordenadas  $x$ ,  $y$  do diagrama CIE de cromaticidade.

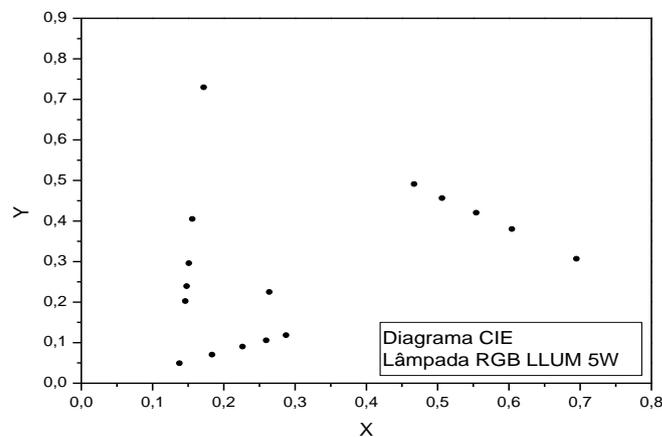


Figura 5- Pontos obtidos através das medidas de cromaticidade da opção de cores da lâmpada LED RGB LLUM 5W, representadas no diagrama CIE.

#### 4- Discussão

É possível observar nas medidas de elipsometria que o valor de delta se aproxima mais do valor medido com o equipamento Acurion. É possível observar na tabela 1, que os valores não divergiram muito dos valores medidos com elipsômetro Acurion. Na amostra C onde houve divergência maior no valor de índice de refração, sugerindo que isso possa estar associado a uma não uniformidade da amostra, ou mesmo um problema de limpeza desta amostra. Este estudo comparativo foi feito com o objetivo de estudar a obtenção dos parâmetros utilizados na elipsometria. Este sistema está sendo ainda aprimorado e está previsto melhorias nos procedimentos e na aquisição das medidas.

Foram feitas medidas fotométricas e colorimétricas preliminares, de acordo com a nota técnica da Osram [AN135, 2019]. Foi identificado um sensor que vai permitir a realização de medidas de acordo com a Norma CIE (2007). Para este sensor é indicado que seja feito um procedimento de calibração, sendo que este dispositivo foi fabricado há cerca de três décadas.

## 5- Conclusão

As medidas de elipsometria realizadas na etapa inicial deste projeto de pesquisa, se mostraram coerentes com os resultados obtidos em equipamentos comerciais de elipsometria. Este tipo de medida envolve grande variabilidade de acordo com as condições usadas para a realização do experimento, tais como comprimento de onda, ângulo de incidência e da técnica utilizada para a obtenção dos parâmetros elipsométricos  $\Psi$  e  $\Delta$ . Além disto, na técnica de elipsometria é necessário que após a obtenção destes parâmetros e para a obtenção do índice de refração a espessura, seja feita uma simulação numérica. Muitas vezes essa simulação depende de condições iniciais para haver convergência na solução. A operacionalização parcial do Microvision SS320 possibilitou a realização de medidas de caracterização espectral de lâmpadas e dispositivos emissores de luz, dos mais variados tipos de encapsulamento e faixas espectrais. Medidas fotométricas e radiométricas foram realizadas de forma preliminar, sendo necessário elaborar um procedimento para a calibração dos sensores.

## Referências

**APPLICATION NOTE #3**, *About Lock-In Amplifiers*, Stanford Research System, [www.thinkSRS.com](http://www.thinkSRS.com) (Consultado em 17/12/2019).

**APPLICATION NOTE AN135**, *Measurement, calibration and measurement uncertainty of Osram Opto Semiconductor LEDs*, Osram, 2019.

**APPLICATION NOTE AN014**, *Partial flux – Measurement reliability of lensed LEDs*, Osram, 2018.

**AZZAM R. M. A.**, *Cap. 16 Ellipsometry*, Handbook of Optics, 2005.

**CIE 127:2007**, *Measurement of LEDs*, 2<sup>nd</sup> edition, 2007.

**NLSW01S01A**, *Specification for Standart LED for total spectral radiant flux*, Nichia Corporation, STS-DA1-5942, Cat.No.171226.

**PEDERSEN K.**, *Ellipsometry, Detection of nanostructures*, Aalborg University, 2004.

**POIKONEN t., MANNINEM P., KÄRHÄ p. IKONEN E.**, *Multifunctional integrating sphere setup for luminous flux measurements of light emitting diodes*, Review of Scientific Instruments 81, 023102 (2010).

**TOMPKINS H. G. & IRENE E. A.**, *Handbook of Ellipsometry*, William Andrew Inc. 2005.

**WANG L., XIE R., SUEHIRO T.**, *Down-Conversion Nitride Materials for Solid State Lighting: Recent Advances and Perspectives*, Chemicals Reviews, 118, pp. 1951, 2018.