

Evaluación de la sensibilidad en la determinación del índice de refracción mediante técnicas CAM y BAM.

José Fernández-Dorado^{1*}, José A. Díaz², J. Arasa³

¹SnellOptics, C/ Prat de la Riba 35, 08222 Terrassa, Spain

²Departamento de Óptica. Universidad de Granada. Edificio Mecenas. 18071-Granada

³CD6 Universitat Politècnica de Catalunya, Rambla de Sant Nebridi, 10, 08222 – Terrassa, Spain

<http://www.snelloptics.com>

1. Introducción

El índice de refracción describe una de las características básicas en la interacción del material con la radiación electromagnética, caracterizar los materiales de una manera rápida y precisa es un objetivo de gran interés para la industria e ingeniería óptica. En la actualidad hay una gran variedad de técnicas experimentales que consiguen obtener, en función del interés y alcance de la aplicación, una medida de éste parámetro con sensibilidad adecuada. [5], [6] La teoría sobre la que se apoyan la mayoría de técnicas experimentales es la elipsometría [7], [8], [1], [4] aunque también se emplean otros efectos como son la refracción, reflexión, scattering etc.

En este trabajo presentamos un análisis de la sensibilidad de los dos métodos más rápidos implementados hoy en día en la industria, ambos basados en la reflexión y refracción de la luz. El método CAM (*critical angle method*) que obtiene el valor del índice a partir del ángulo crítico o también llamado método de Abbe y el método BAM (*Brewster angle method*) que lo obtiene a partir de la reflectancia en ángulo de Brewster, la teoría óptica y matemática de ambos métodos es ampliamente conocida, según algunos autores la resolución en la determinación del índice con el método BAM es mayor que la del CAM [5], sobre todo cuando los materiales presentan una absorción notable, sin embargo, el método del ángulo de Brewster no es usado.

Para analizar la sensibilidad de ambos métodos se ha evaluado el error en la obtención de las curvas de dispersión debidas a la indeterminación angular y a la sensibilidad con la que hemos obtenido el índice de refracción de referencia.

2. Método

2.1 Determinación del índice de refracción

2.1.1. Método CAM

El método CAM obtiene el valor del índice a partir de la evaluación del ángulo crítico (ya sea por transmisión o reflexión) ver Fig 1.

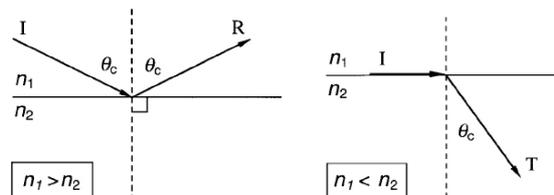


Figura 1: Reflexión total (izquierda) y refracción total (derecha). En ambos casos se muestra el efecto del ángulo crítico en el comportamiento de los haces de luz al interactuar en una interfase. [5]

* e-mail: jose.fernandez@snelloptics.com

En dicha configuración, y siempre que n_1 sea mayor que n_2 , definimos el ángulo crítico como el valor del ángulo de incidencia a partir del cual, toda la luz es reflejada en la interfase de los dos medios: [9]

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad / \quad n_1 > n_2 \quad (1)$$

Si suponemos n_2 es conocido, podemos determinar el índice de refracción del material desconocido (n_1), sin más que despejar de la ecuación anterior.

2.1.2 Método BAM

En este método hemos de colocar la muestra, siempre por reflexión, de forma que, para una longitud de onda determinada esté en condición de ángulo de Brewster. Si n_1 es mayor que n_2 definimos el ángulo de Brewster como el valor del ángulo de incidencia a partir del cual, la luz reflejada en la componente paralela presenta un valor nulo para una longitud de onda concreta. A partir de las ecuaciones de Fresnel y operando, se puede obtener la expresión de la dependencia del índice de refracción con la reflectancia perpendicular que no es nula bajo ángulo de Brewster.

$$n'(\lambda) = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta'(\lambda))} \frac{1 + \sqrt{R_{\perp}(\lambda)}}{1 - \sqrt{R_{\perp}(\lambda)}} \quad (2)$$

En la región del ángulo de Brewster, la componente paralela de la luz en comparación con la componente perpendicular es prácticamente nula como se ve en la Fig 2:

Rpar y Rper en función de la longitud de onda en Ángulo de Brewster para BK7

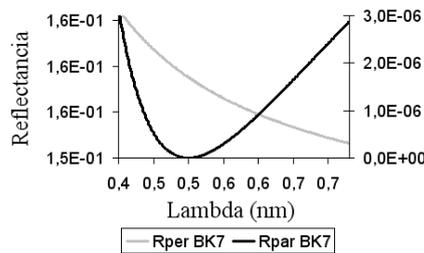


Figura 2: Estudio de las componentes espectrales de la reflectancia en BK7 para el ángulo de Brewster

Así pues, analizando la componente perpendicular de la luz se puede entonces determinar el índice de refracción del material.

2.2 Parámetros limitadores de la resolución

Los parámetros necesarios a tener en cuenta en este método de análisis se pueden ver en la tabla 1:

PARÁMETROS	CAM	BAM
Posición de la muestra	✓	✓
Sensibilidad material referencia	✓	
Sensibilidad medida reflectancia		✓

Tabla 1: Parámetros contemplados en el análisis para cada método.

Los errores de posicionamiento de las muestras a medir son parámetros comunes a analizar. En el CAM además se ha de conocer la sensibilidad del índice de refracción del material de referencia. En el caso del BAM, se ha de conocer la sensibilidad de la reflectancia perpendicular. Estos datos permiten conocer qué tipos de materiales se pueden caracterizar y qué cantidad de energía es necesaria.

3. Resultados

Se han calculado los errores asociados a las medidas de las curvas de dispersión para 80 vidrios del catalogo (Schott), en todos ellos el comportamiento ha sido similar por lo que sólo hemos representado el caso de un vidrio estándar, **N-FK3**. Los errores de posicionamiento empleados son $\pm 0.1^\circ$, valores típicos de posicionamiento de laboratorio aunque se puede llegar sensibilidades por debajo del minuto de arco, por otro lado, los errores asociados al índice de referencia y reflectancia son ± 0.0001 y ± 0.001 respectivamente (ver Fig 4).

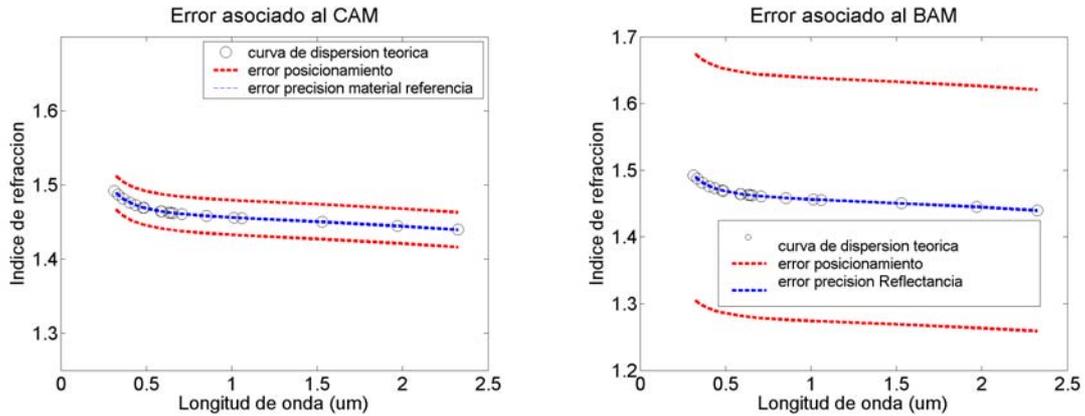


Figura 4: Curvas de dispersión, con su error correspondiente calculadas mediante CAM y BAM, para el caso de N-FK3

Los errores asociados a la sensibilidad de posicionamiento en rojo en la Fig 4 son la fuente de error más importante. La Fig 4 muestra como el error de posicionamiento en el CAM es mucho menor que en el BAM. En el CAM, en azul se muestra el error asociado con la sensibilidad con la que se conoce el índice de refracción del material de referencia, en el BAM en azul se muestra el error asociado con la sensibilidad con la que se conoce la reflectancia perpendicular. Ampliando las curvas azules se obtiene la Fig 5:

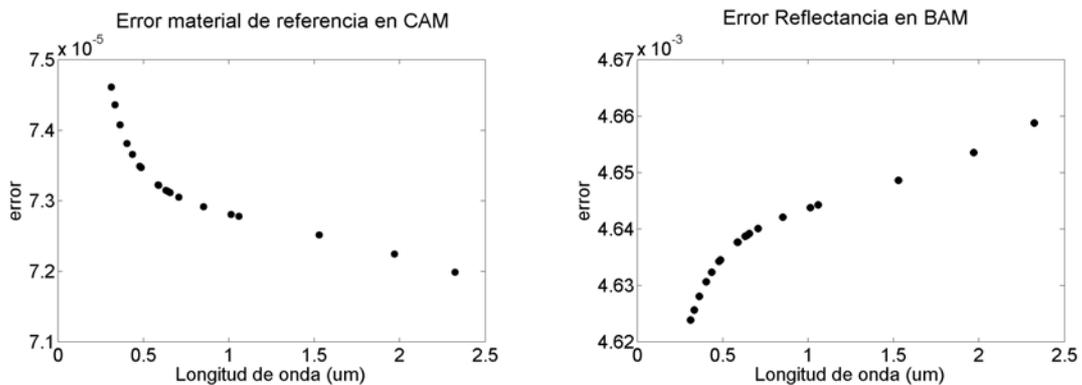


Figura 5: Curvas de error, asociadas al material de referencia y a la reflectancia en CAM y BAM respectivamente para N-FK3

El error cometido según el posicionamiento de la muestra en cada método presenta una dependencia espectral distinta. En CAM disminuye el error monótonamente conforme aumenta la longitud de onda mientras que en el BAM ocurre lo contrario. El orden de magnitud es distinto en cada caso, afecta a la tercera cifra decimal en BAM y a la quinta en CAM. Por tanto, aunque la sensibilidad mecánica (Fig 6) con la que se mida sea la misma en ambos casos, los errores del CAM son menores que los errores del BAM.

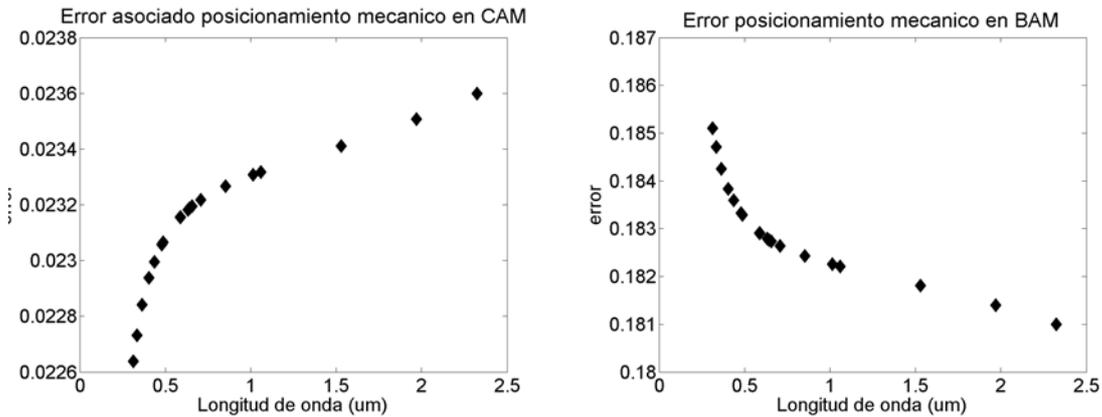


Figura 6: Curvas de error, asociadas al posicionamiento de la muestra en CAM y BAM

4. Conclusión

Las simulaciones muestran una diferencia notable en los errores asociados a la medida del índice de refracción entre los métodos de CAM y BAM. Aunque ambos pueden ser implementados como métodos de caracterización rápida de materiales ópticos dieléctricos para aplicaciones en ingeniería óptica, el método BAM presenta ciertas desventajas respecto al CAM. Estos resultados concuerdan con algunas observaciones hechas por otros autores que afirman que aunque el BAM es un método bien conocido, no es implementado en refractómetros u otros dispositivos [10].

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda en este trabajo del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través de la financiación del proyecto FIS2008-05071.

Bibliografía

- [1] Adolf Canillas i Biosca. "Notas sobre Elipsometría Espectroscópica. Departamento de Física Aplicada i Óptica". Universitat de Barcelona.
- [2] J, Casas. *Óptica*, (Zaragoza, Librería General, 1985).
- [3] W. Nazarewicz, P. Rolland, E. da Silva, and M. Balkanski. "Abac Chart for Fast Calculation of the Absorption and Reflection Coefficients," *App. Opt.*, **1**, (3) (1962).
- [4] Joseph H. Simmons, Kelly S. Potter. *Optical Materials*, (Academic press, 2000).
- [5] G. H. Meeten, "Refractive Index Measurement," (Schlumberger Cambridge Research, CRC Press LLC, 1999).
- [6] Shyam Singh, "Refractive Index Measurement and its Applications," *Phys. Scr.* **65** p. 167 (2002).
- [7] S. Bosch, J. Ferré-Borrull and J. Sancho-Parramon, "A general-purpose software for optical characterization of thin films: specific features for microelectronic applications," *Solid-State Electronics*, Vol. **45**(5), p. 703 (2001).
- [8] S. Bosch, F. Monzonis, "General inversion method for single-wavelength ellipsometry of samples with an arbitrary number of layers," *J. Opt. Soc. Am. A*, **12**(6), p. 1375 (1995).
- [9] Edward Richard Van Keuren. "Refractive index measurement using total internal reflection". *Am. J. Phys.*, **73** (7), p. 611 (2005).
- [10] G H Meeten. "Refractive index errores in the critical-angle and the Brewster-angle methods applied to absorbing and heterogeneous materials". *Meas. Sci. Tech.*, **8** p. 728 (1997).