

## ARTICLE TYPE

# Comprobación de caracterización de oblea de silicio mediante su espectro de reflectancia

J.P. Sanchez, J. Ortíz, and I. Mesa

Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Author for correspondence: F. Author, Email: jose.ortizc@udea.edu.co.

## Abstract

Various optical elements and physical objects display a reflectance spectrum, which is correlated with intrinsic characteristics such as thickness, refractive index, among others. The characterization of an optical film is accomplished through the analysis of its reflectance spectrum. Taking into account this characterization, a theoretical simulation of the spectrum is developed, extrapolating its results to any object based on the information provided in the technical data sheet of the material in question.

**Keywords:** Reflectancia, espectro, refractancia

## 1. Introducción

A lo largo de la evolución de la ciencia y la humanidad, se ha constatado la relevancia especial de la óptica, ya que ha desempeñado un papel crucial en los avances tecnológicos, así como en la esfera de la salud, entre otros campos. En este contexto, se han identificado diversas leyes que correlacionan distintas características de los fenómenos físicos asociados.

Un fenómeno de gran importancia y presencia cotidiana se manifiesta cuando la luz incide sobre un objeto, provocando la reflexión de la luz y generando así el fenómeno conocido como reflectancia. Bajo el marco de las leyes ópticas, es posible demostrar que el espectro de reflectancia se caracteriza por las propiedades inherentes al objeto en cuestión.

Las ecuaciones que rigen estos fenómenos no siempre son de naturaleza sencilla. Un caso particular que se aparta de esta generalización son las películas delgadas, las cuales se distinguen por tener ecuaciones de una simplicidad singular. La validez de estas ecuaciones y su correspondencia con el fenómeno real pueden ser verificadas mediante la aplicación de modelos que las respalden.

En el presente experimento, se persigue la creación de una simulación computacional fundamentada en las leyes ópticas, con el propósito de corroborar la congruencia entre las ecuaciones, en particular aquellas asociadas a la reflectancia, y el espectro de reflectancia medido en una película delgada.

## 2. Marco teórico

Para calcular la reflectancia y transmitancia de un sistema óptico multicapa se utiliza el método de las matrices, en el cual se interpreta cada elemento óptico (en este caso interfaces y medios) como una transformación lineal la cual transforma un par de ondas iniciales en otro par de ondas finales.

La matriz de scattering  $S$  representa la transformación de un par de ondas  $U_1$  y  $U_2$  en una interfaz, que es el lugar donde se solapan dos medios distintos, que notaremos 1 y 2, de modo que los subíndices de  $U$  indican el medio en que se encuentra la

onda, además los índices + y – indica que la onda va del medio uno al medio dos y del medio dos al medio uno respectivamente.

Por lo tanto las entradas de la matriz de scattering son los coeficientes de Fresnel  $t_{12}, t_{21}, r_{12}, r_{21}$  donde  $r$  es reflectancia y  $t$  transmitancia, y los subíndices 12 y 21 representa que viene del medio uno al dos, y del dos al uno respectivamente.

$$M = \frac{1}{t_{21}} \begin{bmatrix} t_{12}t_{21} - r_{12}r_{21} & r_{21} \\ -r_{12} & 1 \end{bmatrix}; P = \begin{bmatrix} e^{-ikd} & 0 \\ 0 & e^{ikd} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Y la matriz  $S$  en términos de las entradas de  $M$

$$S = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} AD - BC & B \\ -C & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Por último, para describir el cambio de fase de la onda debido a la propagación en cierto medio, se utiliza la matriz de transferencia  $P$

$$P \begin{bmatrix} U_{21}^+ \\ U_{21}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-ikd) & 0 \\ 0 & \exp(ikd) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{21}^+ \\ U_{21}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{23}^+ \\ U_{23}^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde los subíndices 21, 23 indican que están en el medio dos, y que el medio mas cercano es el uno y el tres respectivamente.

Todo esto da metodología a seguir, primeramente, calculando las matrices  $S_i$  de cada interfaz  $i$ -ésima, luego se transforma cada una de estas en sus matrices de transferencia  $M_i$  correspondientes, a la vez se calcula la matrices  $P_i$  para cada medio, entonces se aplica el método cascada para obtener la matriz  $M$  que describe todo el sistema, por ultimo se transforma esta ultima en la matriz  $S$  de todo el sistema, cuyas entradas son la reflectancia y transmitancia de todo el sistema.

Para el analizar la cercanía de dos curvas definimos la función  $fit(a, b)$  de la siguiente forma:

$$\frac{\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|}{n} \quad (4)$$

Donde  $a_i$  y  $b_i$  son el valor  $i$ -ésimo correspondientes de la curva  $a$  y  $b$ .

### 3. Metodología

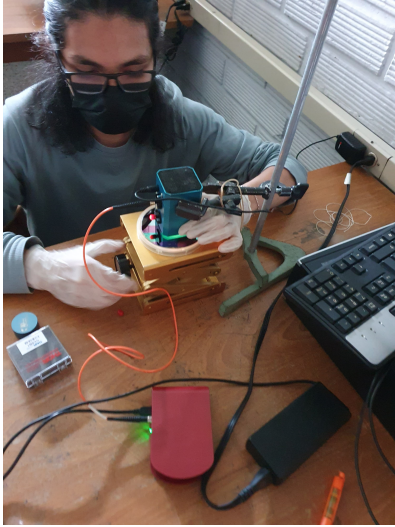


Figure 1. Montaje experimental

Se emplea una esfera integradora para generar un haz de luz que incide sobre una oblea de silicio, dando origen a un espectro a través de sus capas multicapa, donde cada capa tiene un incremento de  $100 \pm 20$  nm en comparación con la anterior y la última de sus capas es la misma capa sobre la cuales todas las anteriores también están puestas y es un sustrato de silicio. Este espectro se registra mediante un espectrómetro, teniendo en cuenta el ruido de fondo en los datos para realizar los ajustes necesarios.

Para la calibración de la esfera, se utiliza un marco de referencia que se guía por un porcentaje de reflectancia. Posteriormente, al analizar las diversas capas de la oblea, se siguen pasos específicos, como la colocación de la oblea en un soporte ajustable y la disposición de la esfera generadora de manera paralela al plano de la oblea. Al desplazar la oblea cerca de la esfera integradora, se logra la alineación con la sección (capa) de interés, permitiendo la obtención de los espectros asociados. Dada la estructura de cinco capas sobre un sustrato, se requieren espectros individuales para cada capa y el sustrato.

Posteriormente, se introducen las características de cada sección desde la ficha técnica de la película delgada en un simulador de espectros de reflectancia, generando así espectros teóricos y experimentales.

Todas las mediciones se efectúan en un entorno controlado, minimizando la luz ambiental para preservar la integridad de los datos y controlar posibles variaciones, como la presencia

de polvo que podría alterar los espectros de las secciones de la oblea.

En el contexto de la comparación teórica, se implementa una simulación en Python del método descrito en el marco teórico. Se utilizan como parámetros la caracterización del fabricante, y para los índices de refracción se emplean archivos .txt proporcionados por la página FILMETRICS para el Si y SiO<sub>2</sub>, considerados como funciones evaluadas del índice de refracción en relación con el índice de refracción.

En la fase de evaluación comparativa, se sobreponen las gráficas obtenidas experimentalmente con el espectrómetro (suavizada) y la simulada en Python (Fig. 2) para cada grosor. Previo al análisis de la concordancia entre ambas curvas mediante la ecuación (6), se realiza un reescalado y desplazamiento de la medida experimental para lograr la coincidencia con la versión simulada (Fig. 3).

Finalmente, se lleva a cabo una variación en el índice de refracción del silicio y en los grosores de las diferentes capas con el objetivo de minimizar el ajuste y alcanzar la mayor proximidad posible entre las curvas.

### 4. Gráficas

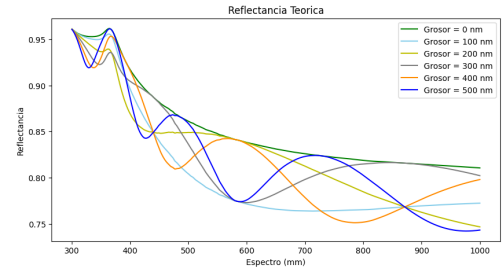


Figure 2. Reflectancia simulada con los parámetros caracterizados por el fabricante

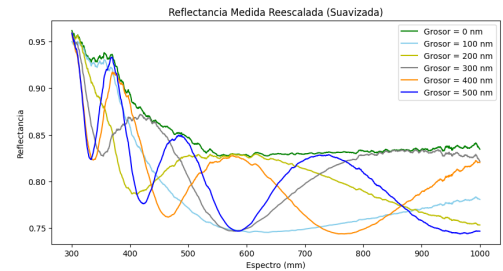
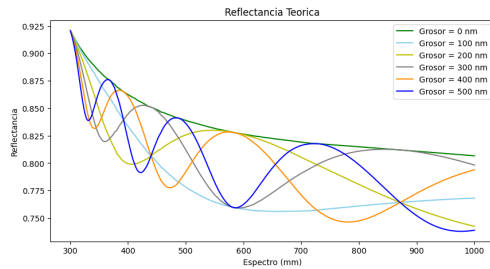


Figure 3. Reflectancia medida, suavizada y reescalada

### 5. Resultados y discusión

Teniendo nuestro modelo computacional como la vista teórica del sistema, podemos hacer una comparación entre los datos obtenidos en el laboratorio y así obtener un índice de relación entre estos dos resultados.

Como podemos observar si hacemos un fitness en ambas gráficas con una corrección horizontal del  $-96.3$  en el índice de refracción del silicio obtenemos que el índice de relación entre



**Figure 4.** Reflectancia simulada, desplazando -96.27 nm para el índice de refracción del Si, con los grosores dados por el fabricante.

los resultados es de un 0.01 resultando así en una aproximación entre los teórico y lo experimental bastante cercana.

Ahora cuando no se tiene presente el desplazamiento nos genera un resultado del 0.02 en el fitness lo cual sigue siendo bastante aceptable como medida experimental.

Aparte de los resultados numéricos hay una característica cualitativa digna de discutir, a pesar de que la grafica simulada se acerca mas a la grafica medida con el desplazamiento horizontal del índice de refracción del Si (Fig. 4), se pierde un rasgo que comparte con la grafica medida, y es ese sobresalto antes de los 400nm, que corresponde al pico más alto del índice de refracción del Si, por consecuente, es probable que el cambio de otro parámetro en el índice de refracción del Si puede reproducir una grafica mas fiel, sin la perdida del sobresalto, pero que en este articulo no se pudo hallar.

Hay que tener en cuenta también posibles causas de error propias del montaje, una de ellas es la distancia a la cual se encontraba la esfera integradora de la oblea de silicio, ya que esto cambia en la forma como se recolectan los datos.

## 6. Conclusion

El código usado es exacto, las graficas conseguidas computacionalmente coinciden satisfactoriamente con las medidas experimentalmente, por otro la caracterización de los grosores coinciden dentro de los errores reportados por el fabricante, mientras que índice de refracción del Si presenta una discrepancia, en el sentido que se obtiene mayor cercanía entre las curvas cuando se desplazan cuando se desplaza horizontalmente su grafica.

## 7. Referencias

Alzate López, H. (2007). Física de las ondas. Universidad de Antioquia.

Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (1991). Fundamentals of Photonics. Wiley.

Maliton, I. H. (1965). Refractive Index Reference (Vol. 55). JOSA. <https://www.filmetrics.com/refractive-index-database/SiO2/Fused-Silica-Silica-Silicon-Dioxide-Thermal-Oxide-ThermalOxide>