

Recubrimientos ópticos en el rango espectral entre 50 y 200 nm

Optical coatings for the spectral range 50 – 200 nm

Mónica Fernández Perea, José Antonio Méndez, Juan Ignacio Larruquert,
José Antonio Aznárez

Grupo de investigación en Óptica de Láminas Delgadas, Instituto de Física Aplicada. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Email: monicafp@ifa.cetef.csic.es

RESUMEN

El desarrollo de recubrimientos ópticos eficientes en la región espectral comprendida entre 50 y 200 nm (UVE-UVL) supone un reto debido a la gran absorción y baja reflectancia que presentan la mayoría de los materiales en este intervalo. Por otro lado estos recubrimientos son una pieza importante para el progreso de multitud de campos como las observaciones astronómicas, el diagnóstico de plasmas y la litografía. En este trabajo se describen algunos de los recubrimientos ópticos desarrollados hasta el momento por el Grupo de investigación en Óptica de Láminas Delgadas (GOLD), que operan en la región UVE-UVL del espectro. En GOLD disponemos de un equipo experimental de ultra-alto vacío que permite la deposición y medida in situ de la transmitancia y la reflectancia de multicapas en función del ángulo de incidencia y en el rango espectral UVL-UVE. Las multicapas están formadas por hasta seis materiales distintos, que pueden ser depositados mediante tres técnicas de preparación diferentes. Las medidas de transmitancia y reflectancia en función del ángulo de incidencia realizadas in situ permiten la determinación de las constantes ópticas (n , k) de los materiales sin que hayan sido expuestos a la atmósfera. Dada la gran dependencia existente entre las propiedades ópticas de las láminas delgadas y la exposición atmosférica en este rango espectral, nuestro equipo experimental constituye una herramienta muy adecuada para su determinación, y por lo tanto para el diseño y preparación de multicapas innovadoras.

Palabras clave: Recubrimientos ópticos, ultravioleta extremo, ultravioleta lejano, láminas delgadas, reflectometría.

ABSTRACT

The development of efficient optical coatings in the spectral region between 50 and 200 nm (EUV-FUV) is an important challenge due to the great absorption and low reflectance that most of the materials present in this region. In addition, these coatings are an important element in the advance of many fields like astronomical observations, plasma diagnosis and lithography. In this work we describe some of the optical coatings developed by the Research Group in Thin Film Coatings (GOLD), which operate in the EUV-FUV region of the spectrum. In GOLD we have an ultra high vacuum experimental system that permits the deposition and in situ measurement of the transmittance and reflectance of multilayers, as a function of the angle of incidence, and in the EUV-FUV spectral range. We prepare multilayers with up to six different materials, which can be deposited using three different techniques. In situ transmittance and reflectance measurements versus the angle of incidence permits the determination of the optical constants (n , k) of the materials, without being exposed to the atmosphere. Due to the great dependence between the optical properties of thin film layers in this spectral range, and the exposition to the atmosphere, our experimental system is a very adequate tool for the determination of those properties, and therefore for the design and fabrication of novel multilayers.

Key words: Optical coatings, extreme ultraviolet, far ultraviolet, thin films, reflectometry.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J. I. Larruquert, R. A. M. Keski-Kuha, "Multilayer coatings for narrow-band imaging in the extreme ultraviolet", *Appl. Opt.* **40**, 1126 – 1131 (2001).
 - [2] D. L. Windt, J. F. Seely, B. Kjornrattanawanich, Y. A. Uspenskii, "Terbium-based extreme ultraviolet multilayers", *Opt. Lett.* **30**, 3186 – 3188 (2005).
 - [3] J. I. Larruquert, J. A. Aznárez, J. A. Méndez, J. Calvo-Angós, "Optical properties of ytterbium films in the far and the extreme ultraviolet", *Appl. Opt.* **42**, 4566 - 4572 (2003).
 - [4] W. R. Hunter, J. F. Osantowski, G. Hass, "Reflectance of aluminum overcoated with MgF₂ and LiF in the wavelength region from 1600 Å to 300 Å at various angles of incidence", *Appl. Opt.* **10**, 540 – 544 (1971).
 - [5] M. Fernández-Perea, J. A. Aznárez, J. Calvo-Angós, J. I. Larruquert, J. A. Méndez, "Far ultraviolet reflectance variation of MgF₂-protected aluminum films under controlled exposure to the main components of the atmosphere", *Thin Solid Films* **497**, 249 – 253 (2006).
-

1. Introducción

El funcionamiento de un recubrimiento óptico se basa en la interferencia de los haces múltiples originados por la reflexión de la radiación electromagnética en las intercaras de separación de las capas que lo forman.

Mientras que la obtención en el visible de reflectancias o transmitancias con una forma espectral determinada y cercanas al 100% es posible mediante la utilización de recubrimientos ópticos formados por un gran número de láminas, la gran absorción de los materiales en el rango espectral comprendido entre 50 y 200 nm (UVE – UVL) limita el número de láminas utilizadas a unas pocas, y las reflectancias o transmitancias resultantes a valores mucho más modestos, muy lejos en general del 100 %.

El aire absorbe fuertemente la radiación de longitud de onda menor que 200 nm, por lo que la reflectometría por debajo de dicha longitud de onda ha de realizarse en vacío. La inexistencia de ventanas transparentes que permitan el aislamiento de la fuente de radiación respecto de la zona de medida dificulta considerablemente el diseño de los equipos de reflectometría, y por lo tanto la dedicación de los grupos de investigación al estudio de las propiedades de los materiales en el rango espectral UVE – UVL ha sido siempre menor que en regiones espectrales como el visible o el ultravioleta cercano. Esta es la razón por la que el conocimiento de las propiedades ópticas de los materiales en este intervalo espectral es aún escaso. Por otro lado, la determinación de dichas propiedades ópticas, en particular del índice de refracción n y el coeficiente de extinción k , es fundamental para el desarrollo de recubrimientos ópticos eficientes.

Los recubrimientos ópticos que funcionan en el rango espectral UVE – UVL tienen aplicación en campos en gran desarrollo en la actualidad, como la instrumentación espacial y la litografía [1,2].

2. Equipo experimental

En GOLD disponemos de un equipo experimental de ultra-alto vacío (UHV), con presiones en la escala de 10^{-10} mbar, que permite la deposición de recubrimientos ópticos y la posterior medida in situ de su transmitancia y su reflectancia en función del ángulo de incidencia. Es decir, las medidas se realizan sin que las muestras hayan sido expuestas a la atmósfera desde su preparación, ya que las distintas cámaras de deposición y la cámara de reflectometría están conectadas entre sí en UHV. Esto es importante porque tanto la transmitancia como la reflectancia en el UVE – UVL se modifican tras la exposición atmosférica debido a la adsorción de especies gaseosas. Las medidas de transmitancia y reflectancia en función del ángulo de incidencia permiten la determinación de las constantes ópticas de los materiales.

En GOLD podemos preparar recubrimientos formados por hasta seis materiales distintos, que se pueden depositar mediante tres técnicas de deposición: evaporación térmica por efecto Joule, evaporación térmica con cañón de electrones, y deposición por bombardeo con haz de iones (Ion Beam Sputtering, IBS). La elección de una técnica u otra dependerá de las propiedades del material a depositar.

La radiación en el rango espectral UVE – UVL se produce en una lámpara de descarga, que emite en las longitudes de onda de emisión del gas que fluye a su través. La ausencia de materiales transparentes

en el UVE – UVL que puedan servir como ventana para la fuente de radiación obliga al uso de un sistema de vacíos diferenciales, que consiste en la comunicación de las distintas cámaras que forman el monocromador mediante tubos de baja conductancia, que permiten el paso de la luz pero limitan de forma severa el flujo de gas. De este modo la presión en la cámara de reflectometría durante las medidas se incrementa solamente hasta 10^{-9} mbar, y se debe principalmente a los gases no reactivos introducidos en la lámpara.

3. Resultados

La labor del Grupo de investigación en Óptica de Láminas Delgadas se centra en la determinación de las constantes ópticas (n, k) de materiales de interés en la región espectral UVE – UVL, el diseño y caracterización de recubrimientos eficientes y el estudio de su estabilidad frente a distintos tratamientos, como exposiciones controladas a distintos gases o calentamientos. A continuación se muestran algunos de los resultados y propuestas realizados en GOLD.

3.a. Determinación de constantes ópticas

La determinación de las constantes ópticas de los materiales en la región espectral UVE – UVL presenta dificultades técnicas, ya que conlleva la medida de la reflectancia y la transmitancia, que además varían cuando los materiales entran en contacto con la atmósfera. Por todo esto las constantes ópticas de muchos materiales son desconocidas en esa región, y las de muchos otros son poco fiables.

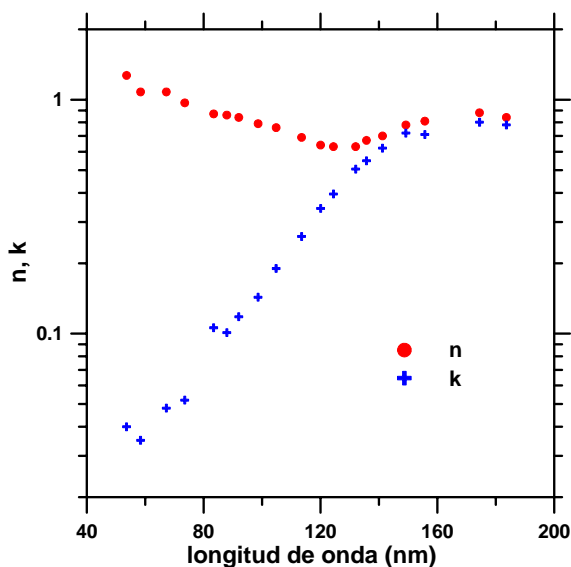


Fig. 1. Constantes ópticas del Yb determinadas en GOLD [3].

En GOLD realizamos la determinación de constantes ópticas utilizando dos métodos: La medida de la reflectancia en función del ángulo de incidencia y la medida de la transmitancia en función del espesor combinada con el análisis de Kramers - Kronig. Utilizando el primer método se han determinado en GOLD las constantes ópticas de materiales como el aluminio, el escandio y el yterbio (véase Figura 1), entre otros.

El segundo método se está utilizando en la actualidad en una investigación general dedicada al estudio de las constantes ópticas de los lantánidos entre 1.24 y 62.0 nm realizada en la línea BEAR del sincrotrón ELETTRA (Trieste, Italia) en colaboración con investigadores italianos. Este segundo método presenta la ventaja de ser más rápido, ya que las medidas se realizan solamente en incidencia normal, pero sólo puede aplicarse cuando la reflectancia normal de los materiales es despreciable, tal y como ocurre en el rango espectral mencionado. Hasta el momento se han llevado a cabo estudios sobre Sc, Yb y Ce. En la Figura 2 pueden verse las constantes ópticas del Sc obtenidas utilizando este método.

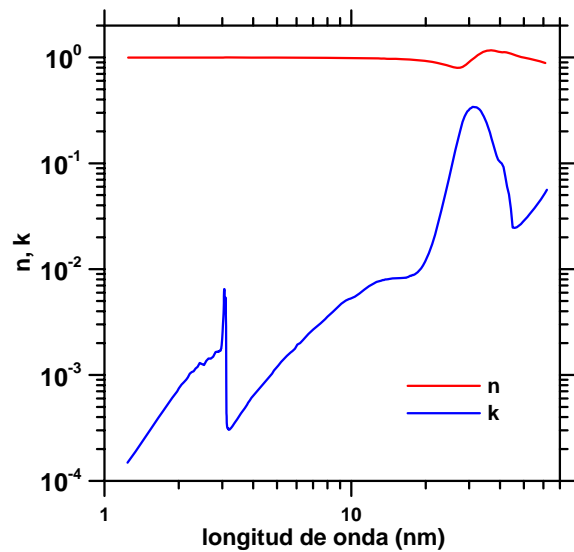


Fig. 2. Constantes ópticas del Sc determinadas en BEAR (Sincrotrón ELETTRA).

3.b. Recubrimientos

En GOLD diseñamos, preparamos y caracterizamos recubrimientos ópticos para las regiones espectrales UVE (50 – 115 nm) y UVL (115 – 200 nm). Las propiedades de los materiales son distintas en ambos intervalos, lo que implica a su vez diferencias en el diseño.

La finalidad de los recubrimientos es o bien obtener una alta reflectancia, en cuyo caso hablaremos de espejos, o una selección espectral ya

sea de la radiación transmitida o de la reflejada, en cuyo caso hablaremos de filtros.

3.b.1. Recubrimientos en el UVL

En esta región espectral disponemos de un material que es transparente en todo el intervalo y tiene propiedades ópticas bastante estables en contacto con la atmósfera: el MgF_2 . Su utilización combinado con Al permite la realización tanto de espejos de alta reflectancia como de filtros.

Los espejos de alta reflectancia en incidencia normal son recubrimientos que se utilizan desde hace décadas [4], y que están compuestos por una lámina de Al recubierta con una de MgF_2 de espesor tal que se maximice la reflectancia en la longitud de onda de interés.

Aunque son recubrimientos bien conocidos, en GOLD hemos observado variaciones de reflectancia frente a exposiciones atmosféricas que no habían sido investigadas con anterioridad [5]. También hemos buscado posibles alternativas en la técnica de deposición que disminuyan este efecto (véase Figura 3).

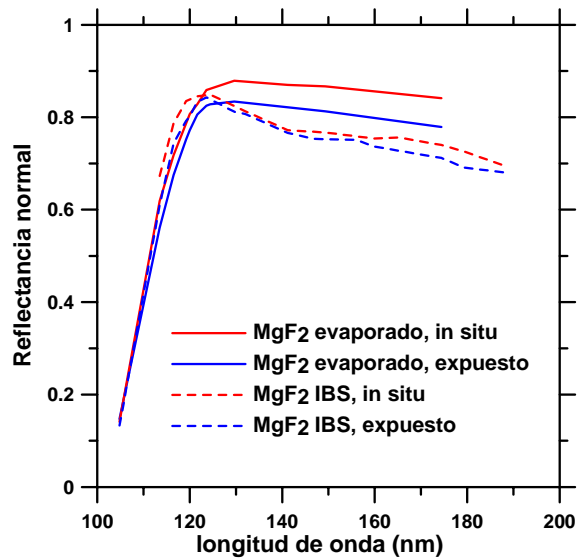


Fig. 3: Reflectancia normal de bicapas de Al y MgF_2 , este último depositado mediante dos técnicas distintas.

En GOLD hemos preparado también filtros de transmitancia en el UVL que alternan capas de Al y MgF_2 . Este trabajo está motivado por la colaboración del grupo en el proyecto World Space Observatory (WSO), que pretende poner en órbita un telescopio espacial que por vez primera estará dedicado en exclusiva a la toma de imágenes y espectros en el ultravioleta. El resultado ha sido la obtención de filtros con mejores prestaciones en cuanto a transmitancia de pico y ancho de banda que los filtros comerciales disponibles (Figura 4).

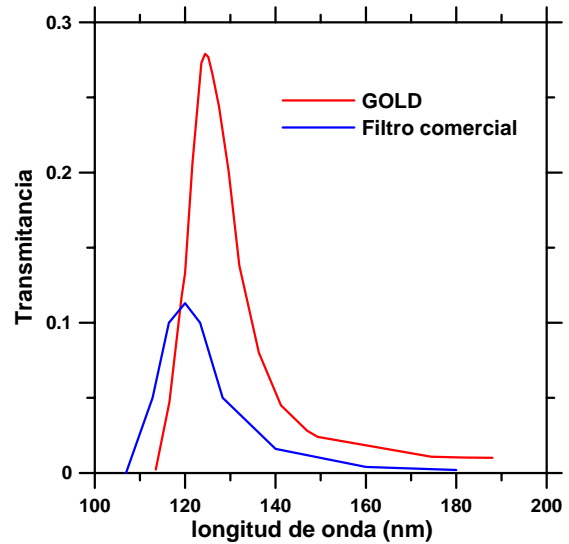


Fig. 4. Transmitancia de un filtro desarrollado en GOLD y uno comercial.

3.b.2. Recubrimientos en el UVE.

La peculiaridad del intervalo espectral UVE es que en él no existe ningún material transparente. Esto implica la imposibilidad de utilizar substratos, entendiéndose como tales aquellos con espesores al menos del orden de los mm, en dispositivos que operen por transmitancia. La alternativa por tanto es o bien trabajar en reflectancia o bien utilizar en lugar de substratos láminas delgadas, típicamente de C, sustentadas sobre rejillas metálicas que dejan pasar una fracción alta de la luz incidente. Ambas posibilidades tienen inconvenientes. Por un lado trabajar forzosamente en reflectancia puede causar problemas en el diseño de algunos dispositivos. Por otro lado los substratos de lámina delgada de C tienen una transmitancia muy pequeña.

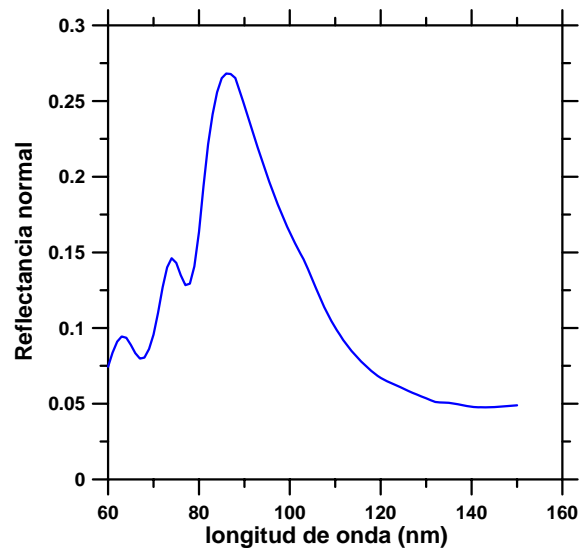


Fig. 5: Reflectancia normal teórica de un filtro diseñado en GOLD.

Un ejemplo de recubrimiento óptico en el UVE que trabaja por reflectancia se puede ver en la figura 5, donde se ha representado la reflectancia teórica de un filtro compuesto por varias capas alternas de Al, Yb y SiO.

4. Conclusiones

En este trabajo hemos mostrado un resumen de los resultados más recientes del Grupo de investigación en Óptica de Láminas Delgadas, cuyo objetivo principal es desarrollar recubrimientos ópticos eficientes en el rango espectral EUV – FUV que sean de interés para la comunidad científica.

Agradecimientos

Agradecemos a José M. Sánchez Orejuela su asistencia técnica. Mónica Fernández Perea agradece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas la financiación a través del programa de becas predoctorales I3P.