

DISEÑO DE FILTROS DE PELÍCULAS DELGADAS PARA LA ELABORACIÓN DE UN SENSOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

N. Kondratiuk^{1,2}, M. Martínez Bogado^{1,2}, M. Tamasi^{1,2}, M. Díaz Salazar^{1,2}, A. Moreno¹

¹ Departamento Energía Solar, Gerencia Investigación y Aplicaciones,
Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA),
Av. General Paz 1499 (1650), San Martín, Buenos Aires, Argentina. Tel. (011) 6772-7837
² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina

Recibido 27/07/17, aceptado 22/09/17

RESUMEN. El Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha trabajado en el desarrollo y fabricación de sensores de radiación solar desde la década del 90, con aplicaciones tanto terrestres como espaciales. En el DES se elaboran y caracterizan sensores solares de silicio cristalino buscando modificar y adecuar su respuesta espectral en la región del ultravioleta (UV) con la finalidad de utilizarlos como instrumentos de bajo costo para medir dicha radiación. Para que el radiómetro funcione como un sensor de radiación UV, es necesario la utilización de un filtro óptico que recorte la región del espectro solar que no se desea sensor. En este trabajo se muestra el diseño de filtros con películas delgadas dieléctricas y metálicas considerando varios materiales y diferentes espesores de capas. Se realizaron simulaciones numéricas para obtener la transmitancia de los filtros que permitan medir bandas estrechas específicas del espectro UV.

Palabras clave: radiación ultravioleta, películas delgadas, radiómetros UV

INTRODUCCIÓN

Los sensores solares fotovoltaicos de silicio se utilizan generalmente para medir la radiación en la banda de longitud de onda de 300 a 1100 nm donde producen una corriente estrechamente proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Estos dispositivos tienen aplicaciones terrestres y espaciales. En aplicaciones terrestres, frecuentemente se emplean radiómetros solares para medir la radiación solar debido a su bajo coste en comparación con los sensores termoelectrónicos piranométricos, cuyo funcionamiento se basa en termopilas. En aplicaciones espaciales, las naves espaciales incluyen dispositivos para la determinación y control de actitudes. Estos tipos de sensores se conocen como sensores primarios, o sensores solares gruesos, y se utilizan, por ejemplo, para orientar los paneles solares (Bolzi et al., 2002).

Los radiómetros fotovoltaicos de semiconductores utilizan un fotodiodo o una célula de silicio como elemento sensible. El flujo radiante incidente en su superficie genera una corriente que es principalmente proporcional a la irradiancia, pero la respuesta de estos dispositivos depende del espectro de radiación por lo que su aplicación es limitada. Un radiómetro puede ser calibrado usando un piranómetro termoelectrónico de referencia cuya respuesta espectral es plana.

La tecnología de fabricación del radiómetro es bien conocida obteniéndose un sensor de bajo costo, con alta potencia y respuesta casi instantánea. Las ventajas de desarrollar estos dispositivos residen principalmente en la posibilidad de proporcionar a las instituciones universitarias y de ciencia y tecnología una herramienta fiable, con una disponibilidad más inmediata y a un costo menor en comparación con los instrumentos comerciales importados. La fabricación de sensores solares es similar a la empleada para las celdas solares de silicio. Basados en la experiencia anterior (Bolzi et al., 2002), los sensores pueden ser diseñados para cumplir con los requisitos para aplicaciones espaciales o terrestres. Disponer de la tecnología para poder fabricar sensores que midan una porción del espectro permite adecuar el instrumento a cada necesidad en cuanto a la medición de radiación y, en particular,

se pueden obtener sensores fotovoltaicos adecuados para su uso como indicadores del nivel de radiación ultravioleta. El trabajo que se presenta forma parte de un proyecto que tiene como finalidad principal el diseño, desarrollo, elaboración, y caracterización de sensores solares de silicio cristalino con el objetivo de modificar y optimizar la respuesta en el UV de dichos sensores.

La aplicación de estos sensores es muy amplia: desde usos en grupos de investigación en biología hasta mediciones en zonas de alta radiación UV, como la región de la Puna Salteña (4000m snm) o Valles Calchaquíes (1600 m snm), para alertar de manera temprana sobre los efectos negativos que una prolongada exposición a esta radiación puede implicar sobre la salud humana. En el transcurso de su vida, las personas en sus distintas actividades propias, se exponen a la radiación del Sol por diversos motivos. El 80 % de los efectos indeseables que origina la exposición solar se debe al espectro ultravioleta B (UVB), comprendido entre los 290 nm y 320 nm de longitud de onda. Poder conocer la dosis de exposición es fundamental ya que existe una relación directa entre su magnitud y el desarrollo de neoplasias, mutaciones, fotoenvejecimiento, inmunosupresión y cataratas. Las medidas de fotoprotección personal, para ayudar a reducir la exposición a la UVER (radiación ultravioleta eritémica), como el uso de sombreros, ropa adecuada, protectores solares y gafas de sol no son puestas totalmente en práctica debido a falta de información y a que no existe obligación legal de controlar.

Debido a su localización geográfica, la Provincia de Salta y en particular la Puna salteña son emplazamientos que reciben dosis elevadas de radiación UV (20 - 30 % mayores que en la ciudad) durante la mayor parte del año (Luccini et al., 2006). Considerando estos antecedentes, grupos de investigación estudian la cantidad de radiación UV que recibe la población en diversas actividades y en diferentes emplazamientos, mediante el uso de dosímetros UV eritémicos personales, y en base a esto pueden proponer medidas para reducir la radiación UV incidente sobre estos grupos (Da Souza Correa et al., 2013; Suárez et al., 2013). La importancia de estos estudios radica en investigar las diferencias en exposiciones personales reales, en lugar de irradiación solo en un plano horizontal.

Para que el radiómetro de silicio funcione como un sensor de radiación ultravioleta, es necesario la utilización de un filtro óptico que recorte la porción del espectro que no se desea sensar. Entre las estructuras aplicables para la elaboración del filtro UV se encuentran las multicapas dieléctricas con índices de refracción bajos y altos (Celanovic et al., 2004). Estas estructuras presentan una propiedad de transmisión periódica lo que significa que un filtro pasa banda en el rango UV va acompañada de bandas de paso indeseables en el intervalo de longitud de onda visible o infrarrojo. Para impedir esto se deben añadir multicapas dieléctricas adicionales con diferentes parámetros ópticos en el diseño, lo que a su vez aumenta el costo de elaboración y su complejidad, ya que se necesita un control preciso del espesor y la uniformidad de las capas. Por lo tanto, a pesar de la transmisión relativamente alta obtenida en el intervalo deseado (Hamded et al., 2011) los filtros dieléctricos tienen sus desventajas para la aplicación en sensores de silicio.

Otra estructura para la elaboración de los filtros son las multicapas metal-dieléctricas, que son aplicadas en filtros desde la década de 1960 (Macleod, 2010; Bater y Bradley, 1966; Baumeister, 1965), por lo que tienen una larga historia de uso como filtros de pasa banda para rangos espectrales desde el ultravioleta al infrarrojo. El diseño básico del filtro metal-dieléctrico es un interferómetro de Fabry Perot de película delgada que consiste en dos películas semitransparentes de metal separadas por una capa dieléctrica. Las pérdidas por absorción en la capa metálica limitan el rendimiento de transmisión del filtro por lo que es necesario elegir metales con una relación k/n grande en la banda de interés. En los últimos años se ha estudiado en detalle estas estructuras para su aplicación en el rango ultravioleta (Zaksic et al., 2005; Mu et al., 2013). Si se utilizan este tipo de estructuras para el filtro, la capa metálica tendría la capacidad de bloquear la radiación visible e infrarroja, y transmitir luz en las frecuencias de resonancia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES ELABORADOS

Los sensores de silicio cristalino que se elaboran en el DES poseen una superficie activa circular de aproximadamente $0,8 \text{ mm}^2$ y una estructura n^+pp^+ elaborados a partir de obleas de Si monocristalino

comerciales tipo Czochralski dopadas con boro, con una resistividad de aproximadamente $2 \Omega\text{cm}$. Se utiliza un proceso de difusión simple en una etapa a 870°C (Besore et al., 1994) para generar la estructura n^+pp^+ (como dopante para la región n^+ se utiliza fósforo a partir de una fuente líquida POCl_3 y aluminio como dopante para la región p^+). La resistencia de capa de la región n^+ es de $60\text{-}90 \Omega/\square$. El área activa de estos sensores se define mediante fotolitografía. Las capas metálicas Ti-Pd-Ag se evaporan para producir contactos delanteros y traseros.

DISEÑO Y SIMULACIONES DE LOS FILTROS

Se realizaron simulaciones numéricas para obtener la transmisión de los filtros de películas delgadas de capas metal-dieléctricas con el fin de optimizar el diseño, para poder medir en bandas estrechas específicas del espectro UV. Se utilizó para ello el software GPL Optical (Centurioni, 2005) para sistemas multicapas desarrollado por el Instituto de Microelectrónica y Microsistemas de la Universidad de Bolonia. Este programa calcula la transmisión espectral teórica del filtro por el método de matriz de transferencia, teniendo en cuenta las pérdidas por absorción. De esta manera se puede simular estructuras multicapas con cualquier número de películas coherentes e incoherentes. El vector de Poynting se utiliza para derivar el flujo de energía luminosa en el caso de una capa con comportamiento coherente. El uso del flujo de energía de luz en lugar de la intensidad de luz más comúnmente utilizada permite el cálculo de la absorción de luz con una mejor precisión y un tiempo de cálculo mucho más corto. Los parámetros de entrada del programa son: el índice de refracción (n) y el coeficiente de extinción (k) para poder representar al material. Se consideraron varios materiales y diferentes espesores de películas para la obtención de filtros para lograr curvas de transmisión de interés. Las simulaciones se hicieron teniendo en cuenta que las películas se depositarán sobre un sustrato de cuarzo.

En el diseño del filtro multicapa se debe tener en cuenta que las láminas dieléctricas deben ser transparentes para el rendimiento de la estructura. Estudios previos (Zaksic et al., 2005; Mu et al., 2013) muestran que se pueden considerar materiales como SiO_2 , MgF_2 , Al_2O_3 , etc. Los cambios en el índice de refracción se pueden compensar modificando el espesor de las películas. En cuanto al material metálico el aluminio y la plata son las opciones comúnmente elegidas. En el caso de multicapas metal-dieléctricas compuestas con Al, la longitud de onda central del filtro se puede modificar realizando variaciones en el diseño (Mu et al., 2013). Cuando se tiene en cuenta Ag, se pueden obtener un filtro con alta transmitancia localizada alrededor de la frecuencia de resonancia de la plata (Mu et al., 2013)

Trabajos anteriores concluyen que con una estructura para los filtros del tipo (dieléctrico-metal-dieléctrico: DMD) se obtiene mayor transmitancia que una estructura (metal-dieléctrico-metal: MDM) (Wang et al., 2005). El diseño elegido para la estructura de los filtros se encuentra representada en la figura 1. Se consideraron filtros con un solo material dieléctrico y teniendo en cuenta como última capa dieléctrica al sustrato (cuarzo).

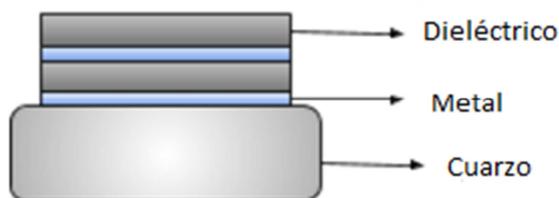


Figura 1: Estructura de los filtros diseñados.

Un primer análisis consistió en variar el espesor de las películas dieléctricas eligiéndolas iguales entre sí para un estudio más simple. Los materiales elegidos para las multicapas metal-dieléctricas fueron aluminio (Al) y alúmina (Al_2O_3). Se consideró una estructura de cuatro capas DMDM-cuarzo y se mantuvo fijo el espesor del metal en 100 nm . Los valores de los índices de refracción y coeficiente de extinción para el aluminio y para la alúmina se obtuvieron de bibliografía (Palik, 1985).

Las simulaciones obtenidas se muestran en la figura 2. Se puede ver que la variación del espesor de las capas dieléctricas determina la longitud de onda en donde está centrado en filtro óptico. Al aumentar el espesor del dieléctrico, el filtro aumenta la longitud de onda en donde se centra el filtro, disminuyendo la transmisión máxima. En particular para un espesor de alúmina de 550 nm se obtiene un filtro que podría utilizarse como filtro de paso de banda UVB con una transmisión máxima del 55 %, pero a su vez se debe elegir correctamente el ancho de banda del mismo.

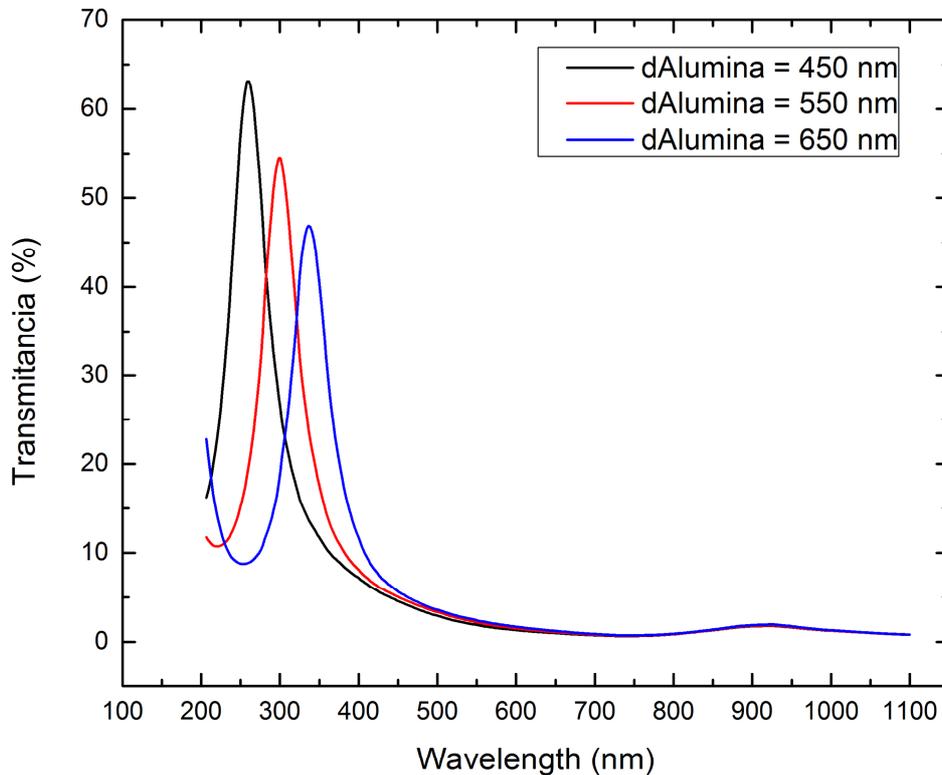


Figura 2: Comparación de la transmittancia simulada para una estructura DMDM-cuarzo con un espesor de aluminio de 100 nm.

Para encontrar un ancho de banda óptimo se puede variar el espesor del metal utilizado. En la figura 3 se muestran las simulaciones realizadas para una estructura DMDM-cuarzo, nuevamente eligiendo como materiales Al y Al_2O_3 . El espesor de las capas dieléctricas se considera iguales entre sí (550 nm) y se varió el espesor de las películas metálicas que fue el mismo para todas las capas. La disminución del ancho de banda del filtro, para lograr un bloqueo del espectro no deseado, conlleva una disminución de la transmisión máxima, por lo que el diseño adquiere un compromiso entre ambos para la obtención de un filtro UVB óptimo.

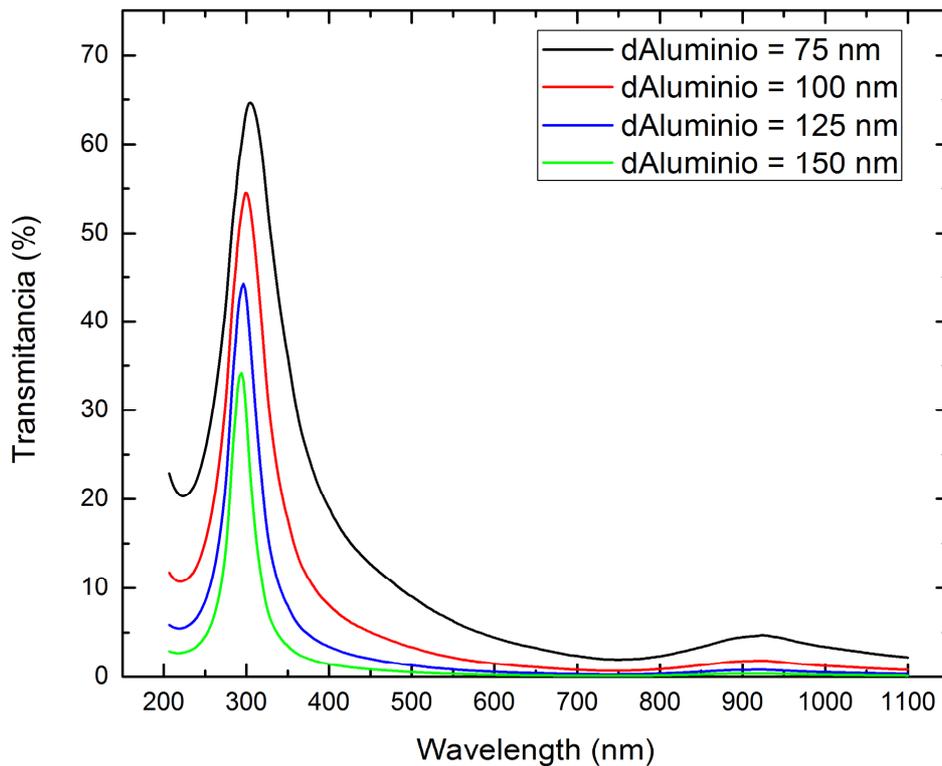


Figura 3: Comparación de la transmittancia simulada para una estructura DMDM-cuarzo con un espesor de alúmina de 550 nm.

Una compensación entre el ancho de banda y la transmisión máxima se puede lograr aumentando la cantidad de multicapas. Esto se puede ver en la figura 4, que muestra las simulaciones realizadas para una estructura de dos capas (DM-cuarzo), cuatro capas (DMDM-cuarzo) y seis capas (DMDMDM-cuarzo). Los materiales elegidos fueron plata (Ag) y dióxido de silicio (SiO_2). Esto implica que la longitud de onda central del filtro está ubicada cerca de los 320 nm, lo que podría ser una buena elección para un filtro de paso de banda UVA-UVB o UVA. El espesor de las películas de plata y dióxido de silicio se mantuvieron en 200 nm y 350 nm respectivamente. Los valores de los índices de refracción y coeficiente de extinción para la plata y para el dióxido de silicio se obtuvieron bibliografía [17, 18].

Se observa que al aumentar en número de capas se obtiene un ancho de banda más estrecho, lo que permitirá obtener un filtro UVA que permita una medición precisa de dicho espectro. Por otro lado si no se desea un gran rechazo fuera de la banda elegida, se puede considerar a la estructura DM-cuarzo como una manera simple de obtener un recubrimiento antirreflexión, donde la transmisión máxima supera el 90 %.

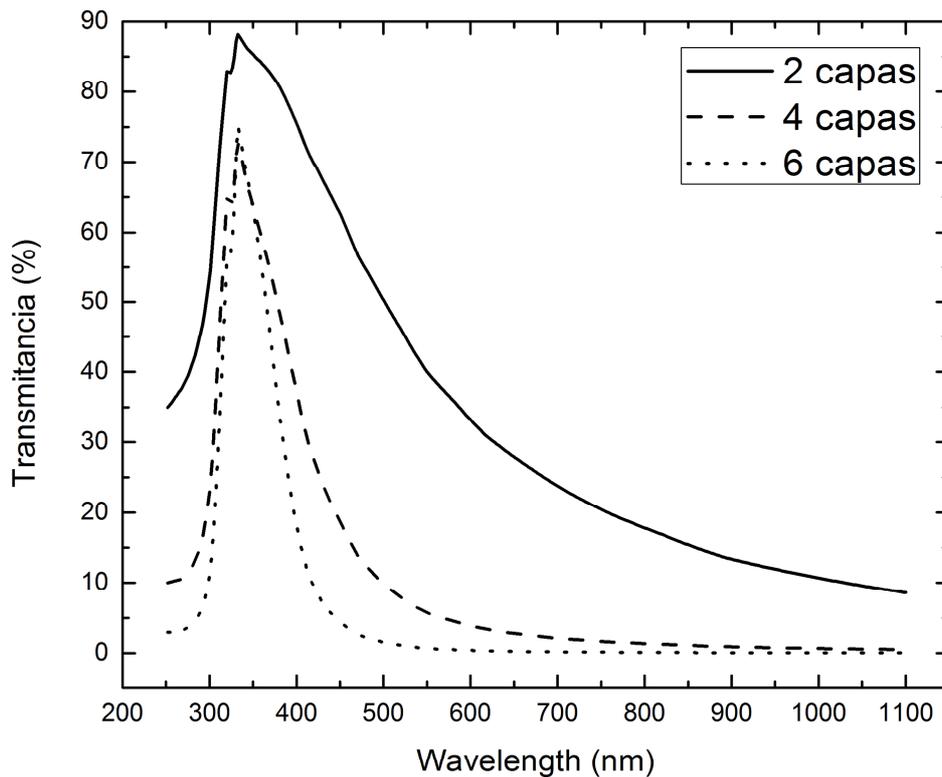


Figura 4: Comparación de la transmitancia simulada para una estructura de multicapas dieléctricas y metálicas sobre cuarzo con un espesor de plata de 200 nm y un espesor de dióxido de silicio de 350 nm.

CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones de multicapas metálicas-dieléctricas para estudiar este tipo de estructuras con el objetivo de encontrar un filtro óptico pasa banda UV adecuado para su uso en sensores fotovoltaicos de silicio. Se pudo observar que con las multicapas de Al/Al₂O₃ se puede obtener un filtro que permita medir el espectro UVB, ya que se puede lograr que la longitud de onda central sea la adecuada, variando el espesor del material dieléctrico. Se considerará variar el espesor de las capas metálicas y dieléctricas entre sí de manera de obtener la transmitancia máxima y el ancho de banda que se desean.

Por otro lado se trabajó con Ag y SiO₂, con el fin de obtener un filtro que sea adecuado para medir en el intervalo UVA, aprovechando la longitud de resonancia de plasma de la plata (320 nm). Se concluye que se puede mantener un alta transmitancia si se aumenta el número de multicapas en la estructura, logrando un ancho de banda óptimo.

Además es importante contar con los valores de los índices de refracción (n) y extinción (k) correspondiente al método de elaboración de las películas, de esta manera se puede considerar que las simulaciones son reproducibles en el laboratorio. Para estimar la precisión requerida en la deposición de capas, se podría introducir en las simulaciones teóricas fluctuaciones aleatorias en el espesor de la capa. Estas fluctuaciones podrían ser simuladas siguiendo distribuciones normales con, por ejemplo, 5 o 10 % de desviación estándar.

REFERENCIAS

- Basore P., Gee M. J., Buck M. E., Schubert W. K. y Ruby D. S. (1994). Simplified high-efficiency silicon cell processing. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 34, 91.
- Baumeister P. W., Costich V. R. y Pieper S. C. (1965). Bandpass Filters for the Ultraviolet. *Appl. Opt.*, 4, 911 - 914.
- Bates B. y Bradley D. J. (1966). Interference filters for the far ultraviolet (1700 Å to 2400 Å). *Appl. Opt.*, 5, 971 - 975.
- Bolzi C.G., Bruno C.J., Durán J.C., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Merino L.M., Plá J.C., Tamasi M.J.L. y Barrera M. (2002). First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 73, 269-280.
- Celanovic I., O' Sullivan F., Ilak M., Kassakian J. y Perreault D. (2004). Design and optimization of one-dimensional photonic crystals for thermophotovoltaic applications. *Optics Letters* 29, 863 - 865.
- Centurioni E. (2005). Generalized matrix method for calculation of internal light energy flux in mixed coherent and incoherent multilayers. *Appl. Opt.*, 44, 7532.
- Da Souza Correa T. G., Salazar G., Martín Fernández M. J., Utrillas P., Martínez Lozano J. A., Fernández C. A. y Suligoy H. C. (2013). Análisis de los efectos de valores extremos de irradiancia UV eritémica en la ciudad de Salta. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, 17, 11, 61-66.
- Gao L., Lemarchand F. y Lequime M. (2013). Refractive index determination of SiO₂ layer in the UV/VIS/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* 8, 13010.
- Hamden E. T., Greer F., Hoenk M. E., Blacksberg J., Dickie M. R., Nikzad S., Martin C. y Schiminovich D. (2011). Ultraviolet antireflection coatings for use in silicon detector. *Design. Appl. Opt.* 50, 4180 - 4188.
- Jaksic Z., Maksimovic M. y Sarajlic M. (2005). Silver-silica transparent metal structures as bandpass filters for the ultraviolet range. *Journal of Optics A*, 7, 51-55.
- Johnson P. B. y Christy R. W. Optical Constants of the Noble Metals, *Phys. Rev. B* 6, (1972) 4370-4379.
- Luccini E., Cede A., Piacentini R., Villanueva C. y Canziani P. (2006). Ultraviolet climatology over Argentina. *Journal of geophysical reserch*, 111, D17312.
- Macleod H. A. (2010). *Thin-Film Optical Filters*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Mu J., Lin P.-T., Zhang L., Michel J., Kimerling L. C., Jaworski F., y Agarwal A. (2013). Design and fabrication of a high transmissivity metal-dielectric ultraviolet band-pass filter. *Appl. Phys. Lett.* 102, 213105.
- Palik E. D. (1985). *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, New York.
- Suárez H., Salazar G., Acosta D., Cadena C., Adámo J., Castillo J., Suligoy H., Fernández C., Marín M. J., Utrillas P. y Martínez Lozano J. A. (2013). Mediación de radiación eritémica en sitios de altura de la provincia de Salta. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 2, 11, 119-127.
- Wang Z., Chen Q., y Cai X. (2005). Metal-based transparent heat mirror for ultraviolet curing applications. *Applied Surface Science* 29, 262-267.

ABSTRACT: The Department of Solar Energy (DES) of the National Atomic Energy Commission (CNEA) has been working on the development and manufacture of solar radiation sensors since the 1990s, for both terrestrial and space applications. In the DES, crystalline silicon solar sensors are developed and characterized in order to modify and adapt their spectral response in the ultraviolet (UV) region to be used as low cost instruments to measure this radiation. For the radiometer to function as a UV radiation sensor, it is necessary to apply an optical filter that cuts out the region of the solar spectrum that is not desired to be sensed. This paper presents the design of filters with thin dielectric and metallic films considering different materials and different layer thicknesses. Numerical simulations were performed to obtain the transmittance of the filters that allows the measurement of narrow bands within the UV spectrum.