

**FABRICACIÓN DE SOLARÍMETROS DE BAJO COSTO EN LA ARGENTINA:
ALGUNAS PROPUESTAS TEÓRICAS Y PRIMERAS EXPERIENCIAS**

J.C. Durán, C.G. Bolzi, E.M. Godfrin, J.C. Plá, L.M. Merino, C.J. Bruno, M.J.L. Tamasi
Grupo Energía Solar - Depto. de Física - Centro Atómico Constituyentes
Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Gral. Paz km 6,5 - 1650 Villa Maipú
Tel: 754-7131 - Fax: 754-7121 - E-mail: duran@cnea.edu.ar

RESUMEN

Se iniciaron actividades de diseño teórico y desarrollo experimental de sensores de radiación solar de bajo costo basados en celdas fotovoltaicas de silicio cristalino. En particular, se analizaron las principales limitaciones, asociadas a la respuesta espectral de las celdas, que atentan contra la precisión de la medición en este tipo de sensores. Se estudiaron y optimizaron multicapas dieléctricas sencillas para ser depositadas sobre el fotodiodo, en reemplazo del tratamiento antirreflectante convencional, de manera de lograr una respuesta espectral lo más plana posible en el rango de longitudes de onda de 350nm a 1000nm. Se realizaron las primeras experiencias de fabricación de piranómetros con celdas solares elaboradas en la CNEA cubiertas con un vidrio esmerilado como difusor frontal.

INTRODUCCIÓN

El uso de piranómetros que utilizan como elemento sensor un fotodiodo de silicio (básicamente, una celda fotovoltaica) se halla fuertemente difundido para la medición de radiación solar, debido a su bajo costo comparado con el de piranómetros basados en termopilas. Los principales inconvenientes de los fotodiodos son: (i) su respuesta espectral limitada y no plana, y (ii) el apartamiento considerable de su respuesta espectral con respecto a la dependencia con el coseno del ángulo de incidencia. Como consecuencia de ello, los valores de irradiación medida pueden diferir de los reales en más de un 10%, dependiendo el error de la altura del Sol y de las condiciones meteorológicas.

Recientemente, diferentes autores propusieron alternativas para mejorar la precisión de piranómetros basados en celdas solares. King y Myers sugirieron nuevos procesos de calibración (King y Myers, 1997). En particular, analizaron el comportamiento de estos sensores en función del ángulo de incidencia y de la masa atmosférica (AM) atravesada por la radiación incidente sobre los mismos. Como resultado de estos estudios, propusieron expresiones analíticas semiempíricas para corregir la lectura del instrumento. Otra propuesta más sofisticada y, en consecuencia, más costosa, es la realizada por M. Gruffke *et al.*. En este caso, el solarímetro desarrollado consta de 135 sistemas ópticos tubulares, con un sensor de silicio en uno de sus extremos, ubicados radialmente sobre una superficie semiesférica (M. Gruffke *et al.*, 1998). En consecuencia, se gana en precisión pero a costa de un importante aumento en la complejidad del dispositivo.

Teniendo en cuenta la necesidad de disponer en el país de sensores de radiación solar confiables y de bajo costo, se iniciaron actividades tendientes a diseñar y construir en el país este tipo de sensores, aprovechando la experiencia adquirida en el desarrollo de celdas solares de silicio cristalino. En el presente trabajo, se analizan teóricamente variantes en el diseño de la celda solar que permitan mejorar su respuesta espectral con vistas a su utilización como piranómetro. En particular, se estudian y optimizan multicapas dieléctricas sencillas para ser depositadas sobre el fotodiodo, de manera de lograr una respuesta espectral más plana en el rango de 350nm a 1000nm. Finalmente, se describe brevemente el proceso de elaboración de los dispositivos.

LAS TÉCNICAS ANTIRREFLECTANTES Y SU RELACIÓN CON LA RESPUESTA ESPECTRAL

Las propiedades que debe satisfacer un fotodiodo para su utilización como celda solar o como sensor de radiación solar son claramente diferentes. Mientras que la primera está diseñada para maximizar la energía generada ante iluminación con radiación solar, el segundo debe poseer una respuesta espectral lo más plana y extendida posible, y una dependencia en función del ángulo de incidencia de la radiación proporcional al coseno de dicho ángulo.

Una celda solar convencional consta esencialmente de una estructura del tipo n^+pp^+ o n^+p realizada sobre un semiconductor apropiado (por ejemplo, silicio). El alto índice de refracción de los semiconductores hace necesario el uso de técnicas antirreflectantes (AR) para minimizar la reflectividad superficial, maximizando en consecuencia la fracción de energía absorbida por la celda. La Fig. 1 muestra el espectro de radiación solar AM1,5 junto con una respuesta espectral típica de una celda solar de silicio cristalino, donde se observa un comportamiento fuertemente dependiente de la longitud de onda y con un máximo desplazado con respecto al del espectro solar. Esta respuesta espectral depende de las propiedades electrónicas (longitud de difusión de portadores, velocidades de recombinación en las superficies, etc.) y estructura del

dispositivo (dopajes superficiales, profundidades de juntas, etc.), así como del tratamiento AR. Es posible modificar algunas características de la respuesta espectral de la celda, por ejemplo el ancho de la campana o la caída en las longitudes de onda cortas ($0,3-0,4\mu\text{m}$) o largas ($1,0-1,1\mu\text{m}$), variando durante el proceso de elaboración parámetros tales como profundidad y dopaje de las juntas. Sin embargo, ello no permite lograr una respuesta espectral más plana, lo que sí puede hacerse modificando las capas dieléctricas depositadas sobre la superficie de la celda.

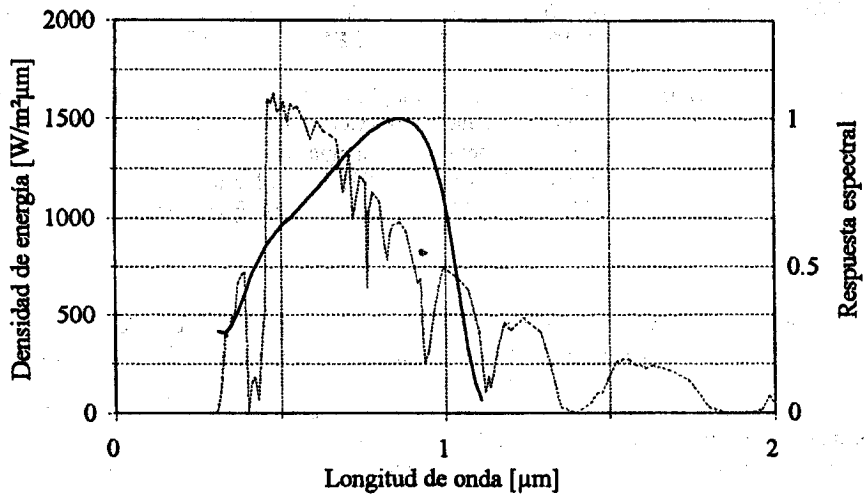


Figura 1: Respuesta espectral (normalizada) típica de una celda solar de silicio monocristalino (—) y espectro solar AM1,5 (....).

Las técnicas AR usuales en celdas solares son (ver, por ej., Zaho y Green, 1991): a) depósito de una o dos capas dieléctricas, b) textura superficial, y c) una combinación de ambas. Todas ellas modifican, en mayor o menor medida, la respuesta espectral interna del dispositivo. En el caso a), se seleccionan el o los materiales dieléctricos con índices de refracción intermedios entre el silicio y el aire o la cubierta protectora (según la utilización que se le vaya a dar a la celda), determinándose los espesores óptimos maximizando la corriente de cortocircuito (Bolzi *et al.*, 1995). Ejemplos de monocapas apropiadas son el ZnS y el TiO_2 , y de bicapa, ZnS-MgF_2 . La reflectancia espectral de una superficie de silicio con una doble capa de ZnS-MgF_2 , sin cubierta protectora, puede verse en la Fig. 2, observándose los dos mínimos que caracterizan las bicapas AR.

Por su parte, la textura superficial en obleas de *Si* cristalino (100) consiste en la formación de pirámides de base cuadrada, con tamaños típicos entre 1 y $5\mu\text{m}$, mediante ataques químicos anisótropos (King y Buck, 1991). Esta geometría se comporta como AR dado que produce reflexiones dobles y triples de los rayos incidentes, reduciendo la reflectividad de la superficie de *Si* de $33,5\%$ a aproximadamente el 10% . A diferencia de las multicapas, la textura superficial muestra un comportamiento prácticamente independiente de la longitud de onda de la radiación incidente.

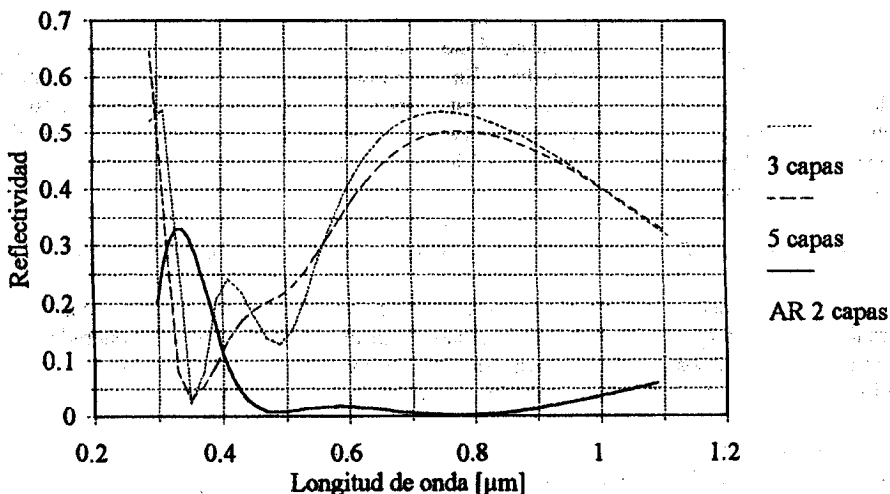


Figura 2: Reflectancia espectral de una superficie no texturada de silicio monocristalino con una bicapa convencional (ZnS-MgF_2), y con 3 ($\text{SiO}_2\text{-MgF}_2\text{-ZnS}$) y 5 ($\text{SiO}_2\text{-MgF}_2\text{-ZnS-MgF}_2\text{-ZnS}$) capas optimizadas para lograr una respuesta plana.

Teniendo en cuenta que la textura superficial prácticamente no modifica la respuesta espectral interna de la celda, en principio se descartó esta alternativa para su uso en sensores y se decidió analizar teóricamente la transmitancia de diversos sistemas de multicapas sobre silicio cristalino no texturado. La optimización de los mismos se realizó minimizando la dispersión de la respuesta eléctrica (o sea, haciendo la respuesta espectral lo más plana posible) en intervalos de longitud de onda de interés, compatible con el rango de respuesta del silicio cristalino ($\lambda < 1,1\mu\text{m}$). Dado que el proceso de elaboración de las juntas da por resultado un dispositivo con un óxido superficial, éste fue incluido en la optimización. Se analizaron los siguientes sistemas: (i) Si-SiO₂-ZnS-Vidrio, (ii) Si-SiO₂-MgF₂-ZnS-Vidrio, y (iii) Si-SiO₂-MgF₂-ZnS-MgF₂-ZnS-Vidrio. Las Figs. 2 y 3 muestran, respectivamente, la reflectancia y la respuesta espectral resultantes para los casos (ii) y (iii) óptimos. En la Fig. 3 se da como referencia la respuesta espectral de una celda solar convencional con bicapa AR.

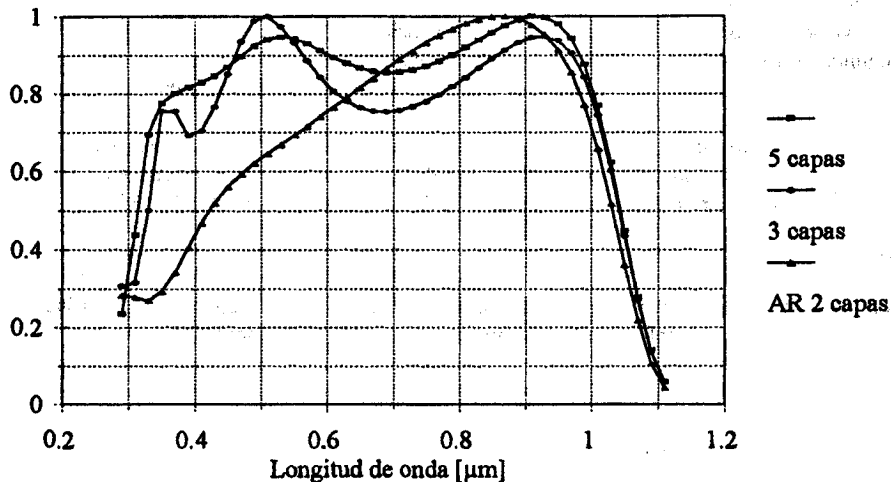


Figura 3: Respuesta espectral de una celda solar de silicio monocristalino con una bicapa convencional (ZnS-MgF₂), y con 3 (SiO₂-MgF₂-ZnS) y 5 (SiO₂-MgF₂-ZnS-MgF₂-ZnS) capas optimizadas para lograr una respuesta plana.

PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS SENSORES

Se incluye en esta sección un breve resumen del proceso de elaboración de las celdas solares a utilizar como sensores de radiación solar, el detalle correspondiente puede verse en publicaciones anteriores (Bolzi *et al.*, 1995; Plá *et al.*, 1998). Las celdas desarrolladas poseen una estructura del tipo n⁺pp⁺. Se utiliza como material de partida obleas de Si monocristalino, crecido mediante la técnica Czochralski, de origen comercial. El proceso de elaboración consta, básicamente, de las siguientes etapas: pulido químico de las obleas, evaporación de Al en una de las caras, generación de las juntas n⁺p y pp⁺, y depósito de los contactos frontal y posterior. Estas etapas se complementan con limpiezas de las muestras, al comienzo y en pasos intermedios.

Entre los diversos métodos propuestos en la bibliografía para la generación de las juntas, se decidió utilizar el método de un paso desarrollado por Basore *et al.*, 1994, y algunas variantes del mismo (Tamasi *et al.*, 1998). En ellos la generación de las juntas n⁺p y pp⁺ se realiza simultáneamente, a una temperatura de 900°C, utilizando una fuente líquida de dopante tipo n (POCl₃), para la primera, y el Al previamente evaporado, para la segunda. Los contactos se obtienen por evaporación, en cámara de vacío, de una multicapa de Ti-Pd-Ag sobre la superficie de Si, utilizando técnicas de fotolitografía para la definición de la grilla de contacto frontal.

Cabe destacar que la capa de SiO₂ crecida sobre la superficie frontal de la celda durante el proceso de difusión tiene, usualmente, un espesor del orden de las decenas de nm. Esta capa influye en las características ópticas de la multicapa dieléctrica que se deposite luego, ya sea ésta de características antirreflectantes o para obtener una respuesta espectral tan plana como sea posible. Por esta razón, en el proceso de optimización teórica de las multicapas presentado en la sección anterior, se incluye una capa de SiO₂.

Las primeras celdas elaboradas para la construcción de sensores de radiación tienen las siguientes características: área activa de aproximadamente 4,5 cm², tensión de circuito abierto de 550-600 mV, corriente de cortocircuito de 110-130 mA, y espesores de SiO₂ de alrededor de 30nm. Estas primeras celdas no poseen multicapas dieléctricas para modificar su respuesta espectral.

El armado final del piranómetro se realiza conectando la celda a una resistencia de carga (típicamente de 1Ω) y pegando sobre la celda un vidrio. A fin de mejorar la respuesta angular del sensor, se realiza un esmerilado de la cara exterior de dicho vidrio mediante una técnica del tipo del arenado. El pegado debe ser realizado mediante un adhesivo resistente a la radiación solar (o sea que no se opaque durante la exposición). En estas primeras experiencias, se utilizó el Dow Corning

93-500. Cabe mencionar que el índice de refracción de este adhesivo es muy similar al del vidrio y, por lo tanto, no afecta el proceso de optimización de la multicapa dieléctrica presentado previamente.

CONCLUSIONES

Las celdas solares de silicio cristalino modificadas para su uso como sensores de radiación solar representan una alternativa de bajo costo para la realización de mediciones solarimétricas. Si bien aún no ha sido realizada la calibración de los primeros sensores fabricados, es posible afirmar que la tecnología desarrollada previamente en el Laboratorio Fotovoltaico de la CNEA es apropiada para tal fin.

La modificación de la respuesta espectral interna de la celda de silicio cristalino, a fin de lograr una respuesta más plana en el rango de longitudes de onda de 350 a 1000 nm, puede realizarse mediante el simple proceso de evaporación de 1, 2 o 4 capas en cámara de vacío. Actualmente, se están realizando los primeros depósitos de multicapas de MgF_2 y ZnS , según lo descrito en la segunda sección de este artículo. Asimismo, se están evaluando alternativas consistentes en el agregado de un colimador entre la celda y el difusor a fin de controlar el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la celda solar.

Una vez finalizada la fabricación de un conjunto de sensores con diferentes características, los mismos serán evaluados tanto en lo que se refiere a su comportamiento en función del ángulo de incidencia cuanto en su respuesta espectral. La calibración final de los sensores será realizada por personal de la Red Solarimétrica del Servicio Meteorológico Nacional.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto de desarrollo de sensores de radiación solar presentado se originó en interesantes charlas con el Dr. H. Grossi Gallegos, quien, sin duda, continuará colaborando en importantes etapas futuras del mismo.

REFERENCIAS

- Bolzi C.G., Bruno C.J., Campitelli E., Durán J.C., Godfrin E.M., Lamagna A., Merino L.M., Plá J.C. y Venier G.L. (1995). Estado actual del desarrollo de celdas solares de silicio en la CNEA. *Anales de la Asociación Física Argentina* 7, 209-212.
- Basore P.A., Gee J.M., Buck M.E., Schubert W.K. y Ruby D.S. (1994). Simplified high-efficiency silicon cell processing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 34, 91-100.
- Grufke M., Heisterkamp N., Matzak S., Ortohann E. y Voss J. (1998). Solar irradiation measurement with silicon sensors. *Proceedings of the 2nd. World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, en prensa.
- King D.L. y Buck M.E. (1991). Experimental optimization of an anisotropic etching process for random texturization of silicon solar cells. *Proceedings of the 22nd. IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 303-308.
- King D.L. y Myers D.R. (1997). Silicon photodiode pyranometers: operational characteristics, historical experiences, and new calibration procedures. *Proceedings of the 26th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1285-1288.
- Plá J.C., Godfrin E.M. y Durán J.C. (1998). Diseño, elaboración y caracterización de celdas solares de silicio cristalino con textura superficial. *Energías renovables y Medio Ambiente* 4, 1-5.
- Tamasi M.J.L., Plá J.C., Bolzi C.G., Martínez Bogado M.G., Venier G.L. y Durán J.C. (1998). Comparison of different simple fabrication processes for high efficiency silicon solar cells. *Proceedings of the 2nd. World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, en prensa.
- Zaho J. y Green M.A. (1991). Optimized antireflection coatings for high efficiency silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices* 38, 1925-1934.