

## **ESTUDIO TEÓRICO DE LA MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE UN SENSOR DE SI MEDIANTE DEPÓSITO DE MULTICAPAS DIELECTRICAS PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN PAR**

**M.J.L. Tamasi, M.G. Martínez Bogado**

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Dpto. Energía Solar - Gerencia Investigación y Aplicaciones - Centro Atómico Constituyentes - CNEA  
Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina  
Tel. (011) 6772-7837 – Fax (011) 6772-7121 – e-mail: [tamasi@tandar.cnea.gov.ar](mailto:tamasi@tandar.cnea.gov.ar)

*Recibido: 09/08/12; Aceptado: 27/09/12*

**RESUMEN:** Este trabajo presenta un estudio teórico para la elaboración de radiómetros para medir la radiación fotosintéticamente activa mediante el depósito de capas antirreflectantes sobre un sensor de silicio. Estos dispositivos están basados en los radiómetros elaborados en CNEA comenzando con el desarrollo de un instrumento que pueda medir esta radiación y proveer en un futuro próximo una herramienta confiable y de bajo costo. Se analizan la respuesta del sensor para distintos materiales dieléctricos, varios números de capas depositadas, diversos ángulos y espectros.

**Palabras clave:** Radiación fotosintéticamente activa, radiómetros, sensor de radiación, silicio.

### **INTRODUCCIÓN**

La radiación fotosintéticamente activa, es un parámetro de importancia relacionado con la porción de la radiación solar global que es aprovechada por las plantas para sus procesos biológicos. Definida como la porción del espectro electro-magnético entre 400 nm y 700 nm, su importancia es clave en la comprensión de diversos procesos biológicos. En esa banda del espectro hay una importante absorción de luz por la clorofila de las plantas, presentándose en ciertas subregiones importantes efectos morfogenéticos y ontogenéticos (Larcher, 1977). También la medición del PAR puede ser de importancia para estimar el crecimiento de cultivos (Magrin et al., 1991). Existen dos tipos de radiómetros comerciales con espectro selectivo: los radiómetros PAR y los denominados luxímetros o sensores fotométricos, generalmente utilizados en el área arquitectónica para medir iluminancia y utilizados en sistemas para control de iluminación y diseño de sistemas de iluminación, entre otras aplicaciones.

Desde el año 1998 la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), a través del Departamento Energía Solar (DES) del Centro Atómico Constituyentes, ha emprendido la fabricación de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo, tanto para la medición de la radiación solar global (Bolzi, Tamasi et. al 2002), como para el PAR (Denegri et al., 2009 y Righini et al. 2009). Los primeros prototipos de radiómetros PAR fueron elaborados con un filtro comercial, calibrados por el Grupo de Estudio de la Radiación Solar de la Universidad Nacional de Luján. En Righini et al. 2009 se presenta el comportamiento de uno de estos radiómetros comparado con uno comercial. Los radiómetros elaborados por en el DES de la CNEA emplean como elemento sensor una celda fotovoltaica de silicio fabricada en sus laboratorios. Disponer de la tecnología para poder fabricar radiómetros que midan una porción del espectro permite adecuar el instrumento a cada necesidad en cuanto a medición de radiación solar.

La tecnología de fabricación de los sensores de radiación solar es similar a la de celdas solares, por lo tanto aprovechando la experiencia adquirida en estos últimos años se diseñan tales sensores en base a los requerimientos de los distintos dispositivos tanto para uso espacial como terrestre. En este trabajo se propone la utilización de materiales y técnicas de depósito de películas dieléctricas para recortar y adecuar la respuesta espectral del sensor para la elaboración de los radiómetros PAR. El objetivo es presentar un estudio teórico de la elaboración de capas dieléctricas para convertir a un radiómetro común en un instrumento que pueda medir ese intervalo del espectro y proveer en un futuro próximo un instrumento confiable y de bajo costo.

### **CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES**

El proceso de elaboración de los sensores de silicio es similar a la elaboración de dispositivos fotovoltaicos (Barrera et. al. 2004), e involucra limpiezas, formación de las juntas y el empleo de técnicas fotolitográficas para deposición de contactos metálicos. En general se utilizan obleas de silicio tipo p, con resistividad de  $2 \Omega \text{ cm}$  y el proceso de difusión empleado es el propuesto por Basore et. al (1994) a  $870^\circ\text{C}$  para lograr una estructura  $n^+pp^+$  simultáneamente y se encuentra detallado en Tamasi et. al, 2007.

El área activa de estos sensores es de  $0,8 \text{ mm}^2$  y queda definida mediante fotolitografía y posterior deposición de los contactos metálicos que se realiza por evaporación en cámara de alto vacío de una multicapa de Ti-Pd-Ag.

La caracterización de los dispositivos se realiza mediante la medición de la curva corriente-tensión (I-V) de la cual se extraen los datos eléctricos en particular de la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ), también se pueden obtener la tensión a circuito abierto ( $V_{ca}$ ), el factor de forma (FF) y el punto de máxima potencia ( $P_{max}$ ). Estos datos pueden obtenerse directamente de los pares medidos de la curva o bien mediante el programa presentado en Godfrin, 2007.

Desde el punto de vista de la caracterización electrónica se dispone de un equipo para medir respuesta espectral (Fortin et al., 2005) y el tiempo de vida media (Bruno et al., 1999). En la Figura 1 se muestra una curva típica medida de la respuesta espectral de un sensor. Además mediante el programa de simulación de celdas solares PC1D (Basore y Clugston, 1997) se simularon las curvas características del dispositivo tanto la respuesta espectral como la curva I-V (Figura 2). Esta herramienta permite obtener, además de estas curvas, los parámetros eléctricos característicos, densidad de portadores, cambiar las características del dispositivo tales como reflectancia superficial, tiempo de vida media del material, profundidad de juntura y dopaje, agregar capas antirreflectantes, cambiar el espectro de iluminación y otras herramientas que posibilitan realizar el diseño previo del dispositivo.

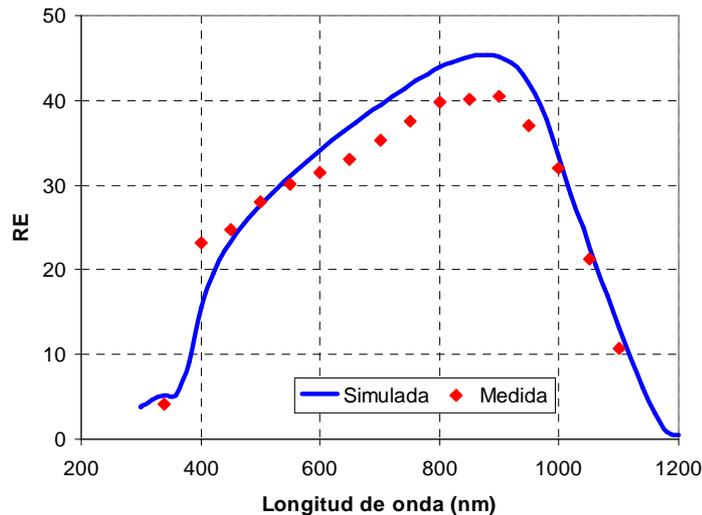


Figura 1: Respuesta espectral medida y simulada con PC1D.

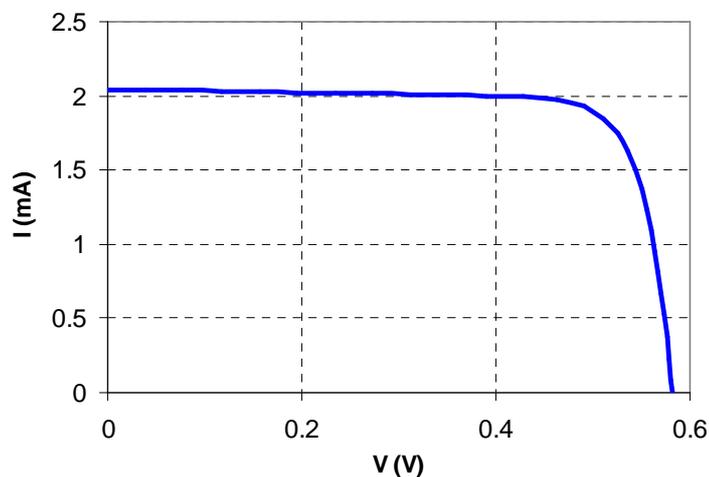


Figura 2: Curva I-V del sensor típico de un radiómetro.

## DISEÑO DEL SENSOR CON CAPAS DIELECTRICAS

### Determinación del número de multicapas

Como primer paso se diseñó un filtro sobre vidrio para realizar el recorte de la radiación dejando transmitir a través de él la radiación PAR. El filtro se diseñó en base a deposición de multicapas de dieléctricos de alto y bajo índice utilizadas para formar un filtro de banda ancha (Born y Wolf, 1980) cuyo apilamiento sobre el vidrio tiene la forma:

$$1,6 (L/2 \quad H \quad L/2)^m \quad (1)$$

donde  $H$  es el espesor de una lámina de cuarto de onda del material de índice alto (por ejemplo  $TiO_2$  con  $n=2,4 @ 550nm$ , o  $ZnS$  con  $n=2,3 @ 550nm$ ),  $L$  es el espesor que se obtiene de una lámina de cuarto de onda del material de índice bajo (por ejemplo  $MgF_2$  con  $n=1,38 @ 550nm$ , o Criolita con  $n=1,35 @ 550nm$ ) y  $m$  es la cantidad de conjuntos o tricapas que se depositan.

Se eligió esta configuración por su sencillez y menor número de capas a depositar, ya que existen otras similares para recortar el espectro, por ejemplo combinando filtros pasa bajos y pasa altos, pero todos ellos requieren la superposición de 30 capas por lo menos (Born y Wolf, 1980).

La simulación de la transmitancia del filtro se realizó con programa Optical (Centurioni, 2005) que permite formar la estructura deseada a partir de los datos de índices ópticos de los distintos materiales. Este programa permite obtener como salida tanto la transmitancia como la reflectancia y absorbancia. El estudio de la simulación de multicapas dieléctricas sobre vidrio puede verse en Tamasi, 2010.

Se consideraron distintos materiales con índices altos y bajos y distintas combinaciones estudiándose la transmitancia para un conjunto de 15 capas o 5 tricapas definidas por la ecuación 1 en cada caso. Los materiales considerados se encuentran en la Tabla 1 en donde se especifican los índices a una longitud de onda de 550nm y el espesor. Se consideró a esta longitud de onda de diseño debido a que se ubicaba en la mitad del intervalo a considerar.

| Material                 | n (@ 550nm) | espesor (nm) |
|--------------------------|-------------|--------------|
| $MgF_2$                  | 1,35        | 797          |
| Criolita ( $Na_3AlF_6$ ) | 1,38        | 815          |
| $Al_2O_3$                | 1,78        | 618          |
| $ZnS$                    | 2,3         | 957          |
| $TiO_2$                  | 2,74        | 803          |
| $Ta_2O_5$                | 2,09        | 1053         |

Tabla 1: Índice y espesor óptimo de los materiales dieléctricos considerados.

Se consideraron capas dieléctricas de alto y bajo índice, eligiéndose en un principio  $ZnS$  y  $MgF_2$  respectivamente como se indica en la ecuación 1 depositadas sobre el sensor de Si. Se estudiaron conjuntos de 9, 12 y 15 capas depositadas sobre Si, simulando con el programa OPTICAL la reflectancia espectral para los depósitos. Estos datos de reflectancia se introducen en el programa PC1D para obtener la respuesta espectral del dispositivo simulado. En la Figura 3 se muestran estas curvas correspondientes a un sensor sin depósito, al mismo sensor con 9, 12 y 15 capas, y con un filtro ideal definido por el recorte en 400 y 700 de la respuesta espectral.

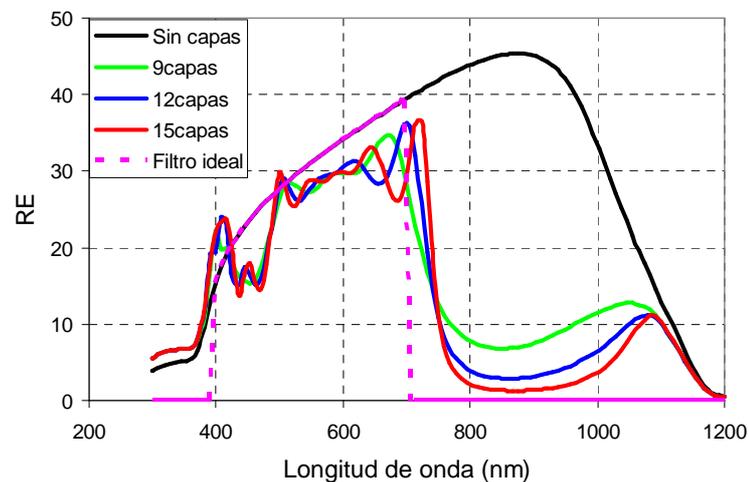


Figura 3: Respuesta espectral simulada de un sensor sin capas dieléctricas (AR) y con depósito de 9, 12 y 15 capas.

Se calculó la  $I_{cc}$  para las configuraciones ya mencionadas a partir de un espectro estándar AM1.5 pudiéndose ver en la Tabla 6. Como en el caso de los filtros ópticos la diferencia menor con el filtro ideal se encuentra con el depósito de las 15 capas.

| Configuración del sensor | $I_{cc}$ (mA) |
|--------------------------|---------------|
| Sin depósito AR          | 2,07          |
| Con 15 capas AR          | 1,10          |
| Con 12 capas AR          | 1,13          |
| Con 9 capas AR           | 1,20          |
| Filtro ideal             | 0,99          |

Tabla 2: Cálculo del valor de  $I_{cc}$  para distintos números de capas.

#### Elección de materiales dieléctricos

Una vez establecido el número de capas se simuló la respuesta espectral de los sensores con capas dieléctricas con distintas combinaciones de materiales para estudiar su comportamiento. En la Figura 4 se muestran algunas respuestas en el intervalo de interés.

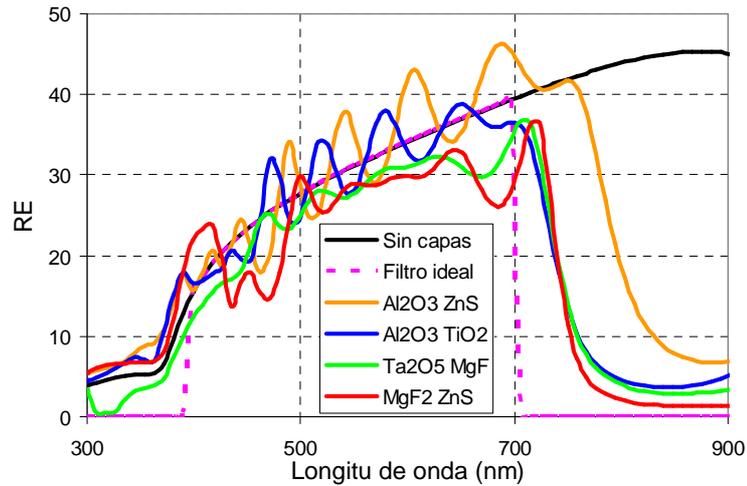


Figura 4: Respuesta espectral simulada en el intervalo de interés de un sensor sin capas antirreflectantes y con depósitos de distintos materiales.

Además de estudiar la forma de la curva de respuesta espectral se realizó el cálculo de  $I_{cc}$  para estas combinaciones comparándolas con el filtro ideal. De la Figura 4 y de la Tabla 3 se puede ver que si bien la transmitancia en la zona de interés tiene menores oscilaciones para la combinación de  $Ta_2O_5$ - $Mg_2F$ , la más cercana en  $I_{cc}$  a la del filtro ideal es la que tiene al  $ZnS$  y  $MgF_2$  como materiales antirreflectantes.

| Configuración de las multicapas | $I_{cc}$ (mA) |
|---------------------------------|---------------|
| Filtro ideal                    | 0,99          |
| AR $MgF_2$ $ZnS$                | 1,10          |
| AR $Ta_2O_5$ $Mg_2F$            | 1,22          |
| AR $Al_2O_3$ $TiO_2$            | 1,39          |
| AR $Al_2O_3$ $ZnS$              | 1,69          |

Tabla 3: Cálculo del valor de  $I_{cc}$  para las distintas combinaciones de materiales dieléctricos.

#### VARIACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL CON EL ÁNGULO DE INCIDENCIA Y EL ESPECTRO DE ILUMINACIÓN

Como en los casos anteriores se calculó la  $I_{cc}$  para los distintos ángulos de incidencia para las 15 capas de  $ZnS$ - $MgF_2$  (Figura 5), en este caso para ángulos mayores a  $45^\circ$  comienzan a contribuir a la  $I_{cc}$  las longitudes de onda mayores a 800 nm, sin embargo no hay una gran variación del valor de  $I_{cc}$  (Tabla 4).

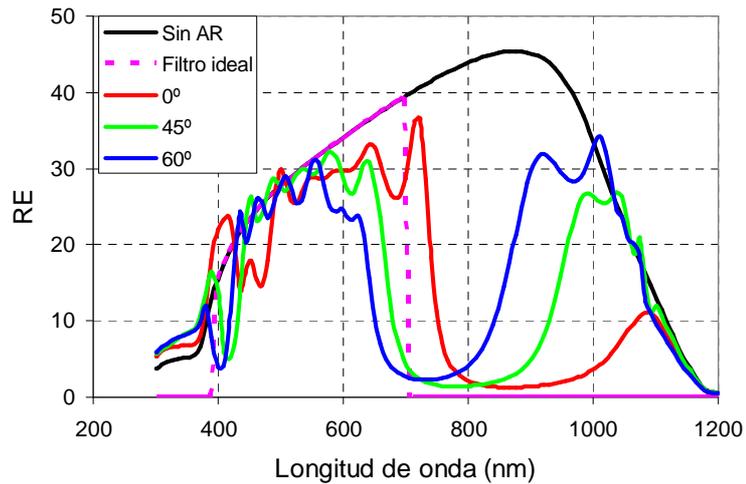


Figura 5: Variación de la respuesta espectral con el ángulo de incidencia para una estructura con 15 capas de ZnS-MgF<sub>2</sub>

| Angulo | I <sub>cc</sub> (mA) |
|--------|----------------------|
| 0°     | 1,05                 |
| 45°    | 1,09                 |
| 60°    | 1,11                 |

Tabla 4: Cálculo de I<sub>cc</sub> para los distintos ángulos de incidencia

Para estudiar la influencia del espectro de iluminación se calculó la variación de I<sub>cc</sub> para los espectros AM1.5, AM2 y AM3 (Figura 6) global y la contribución de la radiación difusa, obtenidos de Gueymar 2001.

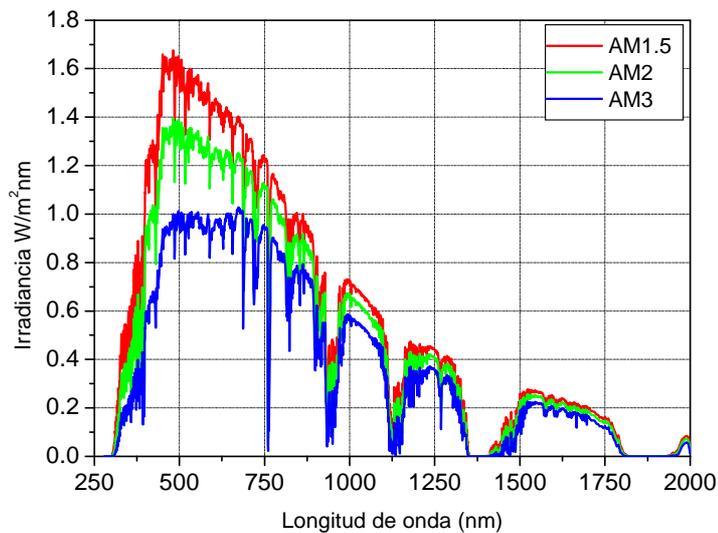


Figura 6: Espectros AM1.5, AM2 y AM3 global.

El cálculo fue realizado para un sensor sin multicapas con los distintos espectros y para el sensor con 15 capas de de Mg<sub>2</sub>F-ZnS con la misma iluminación. El cociente entre la I<sub>cc</sub> para los espectros AM2 y AM3 respecto de la I<sub>cc</sub> para el espectro AM1.5 es similar tanto para el sensor sin multicapas como para el sensor PAR y a su vez es similar al cociente de irradiancias para los espectros mencionados.

| Espectro | Irradiancia (W/m <sup>2</sup> ) | Irrad. espectro/ Irrad. AM1.5 | Sin multicapas              |   |                             | Con 15 capas Mg2F-ZnS       |   |                             |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|
|          |                                 |                               | I <sub>cc</sub> (Global) mA | I <sub>cc</sub> espectros/ I <sub>cc</sub> AM15 | I <sub>cc</sub> (Difusa) mA | I <sub>cc</sub> (Global) mA | I <sub>cc</sub> espectros/ I <sub>cc</sub> AM15 | I <sub>cc</sub> (Difusa) mA |
| AM1.5    | 993                             | 1                             | 2,05                        | 1   | 0,24                        | 1,17                        | 1   | 0,16                        |
| AM2      | 858                             | 0,86                          | 1,79                        | 0,87  | 0,22                        | 1,00                        | 0,86  | 0,14                        |
| AM3      | 671                             | 0,68                          | 1,41                        | 0,69  | 0,20                        | 0,76                        | 0,65  | 0,12                        |

Tabla 5: Cálculo de  $I_{cc}$  para los espectros AM1.5, AM2 y AM3.

### ESTIMACIÓN DEL ERROR EN LA DEPOSICIÓN DE LAS MULTICAPAS.

La deposición de las multicapas dieléctricas sobre Si se realiza en una cámara de vacío con un instrumento para medición de los espesores depositados. Para esta tarea existen equipos automáticos que garantizan una buena precisión en el depósito de las capas. En equipos como los que se cuentan en general en los laboratorios de investigación de la CNEA el corte del depósito de estas capas se realiza de manera manual mediante la interrupción de la evaporación con un obturador. Esta técnica introduce una diferencia en el espesor de las capas depositadas siendo éstas aleatorias y dependientes en gran medida de la habilidad del operador del equipo.

Para simular la incertidumbre introducida en la deposición se introdujeron variaciones aleatorias en los valores de cada capa (en exceso y en defecto) con una distribución normal y desviaciones del 5 y del 10% (al cual se denominó error máximo). Se generan varios conjuntos con estos valores y se calcula la  $I_{cc}$  en cada uno como en los casos anteriores, luego para cada valor de error máximo se calculó el promedio de  $I_{cc}$  que se muestran en la Tabla 6.

| Configuración del sensor                   | $I_{cc}$ (mA) |
|--|---------------|
| Sin filtro                                 | 2,07          |
| Con filtro ideal                           | 0,99          |
| Con filtro de 15 capas                     | 1,10          |
| Con filtro 15 capas y error máximo del 5%  | 1,09          |
| Con filtro 15 capas y error máximo del 10% | 1,15          |

Tabla 6: Cálculo del valor de  $I_{cc}$  para estimación del error en la deposición.

Como se puede observar la  $I_{cc}$  no presenta una diferencia importante al introducir una incertidumbre del 5%, en cambio al aumentar este valor al 10% esta diferencia se incrementa al 5%.

### CONCLUSIONES

La experiencia previa adquirida en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos en el Grupo Energía Solar permitió la adaptación de las celdas solares convencionales a sensores desarrollados *ad hoc* para cada necesidad, tanto la utilización de estos sensores para medición de radiación solar global y PAR como su utilización en satélites como sensores de posición (Tamasi et al., 2007).

Teniendo en cuenta la forma de la curva de respuesta espectral en el estudio de capas dieléctricas, se considera que un conjunto de 5 tricapas definidas en la ecuación 1 (15 capas) es la cantidad más apropiada a depositar en ambos casos.

Se estima que el error en la deposición de las multicapas, por experiencias previas, puede rondar entre un 3 y 5% en los equipos de los laboratorios de CNEA. Si bien existen métodos para ir corrigiendo la diferencia de espesores en la deposición mediante la adecuación mediante cálculo de las capas sucesivas (Bousquet, et al. 1972), en este caso no se considera necesario.

Como conclusión final se puede destacar que la implementación tanto del depósito de capas sobre Si como de los filtros ópticos es similar en cuanto a respuesta del radiómetro. Los cálculos de  $I_{cc}$  no muestran mayores diferencias en utilizar un filtro óptico o el sensor con las capas depositadas directamente sobre él.

Una vez elaborados los sensores se realizarán las pruebas de campo y la correspondiente calibración por el GERSolar de la Universidad Nacional de Luján.

### AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a Cristián Bruno y a Julio Durán por el apoyo recibido en este tema y sugerencias y a Hugo Grossi Gallegos por su constante apoyo y colaboración en el proyecto de radiómetros elaborados en CNEA.

### REFERENCIAS

Basore P., Gee M.J., Buck M.E., Schubert W.K. y Ruby D.S.. (1994) Simplified High-Efficiency Silicon Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells. 91.

- Basore P. y Clugston D. (1997) PC1D Version 5: 32-bit Solar Cell Modeling on Personal Computers, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, Sep-Oct 1997, pp.207- 210.
- Barrera M., Bolzi C.G., Corvalán D., Martínez Bogado M.G., Plá J., Tamasi M.J.L. (2004). Últimos desarrollos en celdas solares de silicio en CNEA. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 8, pp. 4.19.
- Bolzi C.G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, 11.01.
- Born M. y Wolf E. (1980) Principles of optics. 6° Edición Pergamon Press.
- Bousquet, P., Fornier A., Kowalczyk R., Pelletier E. Roche P. (1972). Optical filters: monitoring process allowing the auto-correction of thickness errors. Thin Solid Films 13 (1972) pp. 285-290
- Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. and Durán J.C. (1999). Determination of minority carrier lifetime in solar cells: a novel biased OCVD technique. Physica Status Solidi (a) 174, 231.
- Centurioni E. Generalized matrix method for calculation of internal light energy flux in mixed coherent and incoherent multilayers, Applied Optics, Vol. 44, No. 35 (2005), pp 7532-7539.
- Denegri M.J., Righini R., Grossi Gallegos H., (2009) Estudio comparativo del comportamiento de un sensor PAR desarrollado por CNEA. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 13, pp. 11.33 -11.40
- Fortin S., Martínez Bogado M.G., Plá J., Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones. (2005) Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, pp. 04.01-04-06.
- Gueymar C. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. Solar Energy, vol. 71, No.5, 325-346
- Godfrin E.M., Durán J.C., Fernández Slezak D., Berbeglia G.. (2007). Design and simulation of the power subsystems for two argentine satellites Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milan, Italy, pág. 692.
- Larcher W. (1977). Ecofisiología vegetal. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Magrin G., Díaz R., Rebella C., Del Santo C. y Rodríguez R. (1991). Simulación del crecimiento y desarrollo de trigo en Argentina y la necesidad de información meteorológica de entrada. Anales del CONGREGMET IV. pp 49-50.
- Righini R., Grossi Gallegos H., Bolzi C.G., Martínez Bogado M., Tamasi M. (2009) Comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por CNEA respecto a un radiómetro PAR comercial KIPP & ZONEN. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 13, pp. 09.07-09.11.
- Tamasi M. J. L., Martínez Bogado M. G., Rodríguez S. E., Prario I., Socolovsky H. P., Plá J. C., Alurralde M. A., Nigri C., Filevich A. (2007) Diseño, fabricación, caracterización y ensayos de sensores para la misión satelital Aquarius-SAC-D. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 11, 04.01.
- Tamasi M. J. L. (2010) Diseño de un sensor de silicio para la medición de la radiación fotosintéticamente activa. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 26, pp. 27-33

## ABSTRACT

This paper presents a theoretical study for the development of radiometers to measure photosynthetically active radiation using antireflection coating on a silicon solar sensor. These devices are based on the radiometers developed in CNEA The object is transform the low cost radiometer fabricated in CNEA in a low cost and reliable instrument to measure the PAR radiation. The response of the sensor were analyzed for different dielectric materials, numbers of layers deposited, incidence angles and spectrum.

**Keywords:** photosynthetically active radiation (PAR), radiometer, sun sensors, silicon