

DISEÑO DE UN SENSOR DE SILICIO PARA LA MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA

M.J.L. Tamasi

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET
División Energía Solar - Gerencia de Investigación y Aplicaciones no Nucleares - Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín- Buenos Aires- Argentina
Tel. (54-11) 6772-7837, Fax (54-11) 6772-7121, E-mail: tamasi@tandar.cnea.gov.ar

Recibido: 3-11-10; Aceptado: 30-11-10.

RESUMEN.- Este trabajo presenta un estudio teórico para la elaboración de radiómetros para medir la radiación fotosintéticamente activa mediante dos métodos: el diseño de filtros ópticos y 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 tanto la transmitancia de los filtros ópticos como la respuesta del sensor para distintos materiales dieléctricos, varios números de capas depositadas, diversos ángulos y la evaluación de la incertidumbre introducida en la deposición de las capas.

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

DESIGN OF A SILICON SENSOR FOR PAR RADIATION MEASUREMENT

ABSTRACT.- This paper presents a theoretical study for the development of radiometers to measure photosynthetically active radiation using two methods: the design of optical filters and antireflection coating on a silicon sensor. These devices are based on the radiometers developed in CNEA. The object is to transform the low cost radiometer fabricated in CNEA into a low cost and reliable instrument to measure the PAR radiation. The transmittance of optical filters and the response of the sensor were analyzed for different dielectric materials, numbers of layers deposited and incidence angles. The uncertainty introduced into the deposition of the layers was evaluated.

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

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores fotovoltaicos son utilizados para la medición de la radiación solar, en el intervalo de longitudes de onda donde tiene respuesta, que para el Si, en general está entre 300 y 1200 nm, entregando una corriente proporcional a la radiación incidente. Estos dispositivos tienen aplicaciones tanto terrestres como espaciales. En particular, en su utilización terrestre, los radiómetros fotovoltaicos están muy difundidos para la medición de radiación solar debido a su bajo costo (Bolzi, Tamasi et. al. 2002) comparado con sensores termoelectrónicos como los piranómetros cuyo funcionamiento está basado en termopilas. En su aplicación espacial son utilizados en satélites para orientar los paneles solares denominados sensores primarios o sensores gruesos de posición (Bolzi, Bruno et al. 2002 y Tamasi et al. 2007). Son configurados en general de a pares y la señal de estos sensores, previamente calibrada, permite el control de actitud del satélite, siendo una parte fundamental del sistema de orientación con respecto al Sol.

Los radiómetros fotovoltaicos poseen como elemento sensi-

ble un dispositivo semiconductor, como por ejemplo un fotodiodo o una celda de silicio, que al recibir un flujo radiante genera una corriente proporcional a la irradiancia la que, al circular por una resistencia de carga, genera una diferencia de potencial. La respuesta espectral de un sensor de silicio no es plana sino selectiva, dependiendo de la longitud de onda de la radiación, lo cual limita su uso a la determinación de valores diarios de la irradiación global una vez que se ha comparado estadísticamente su comportamiento con el de un piranómetro termoelectrónico y determinado su constante media. Sin embargo, su bajo costo, su salida eléctrica elevada (un orden superior a la de los termoelectrónicos) y su respuesta casi instantánea los hace particularmente útiles para integrar una red de bajo costo como piranómetros secundarios para interpolar estaciones termoelectrónicas o para la detección de pequeñas fluctuaciones rápidas.

Los datos de irradiación global (medida o estimada), en general, son de fácil acceso y disponibilidad, en cambio, no es frecuente contar con valores de radiación fotosintéticamente activa o radiación PAR (Photosynthetically Active Radiation) aunque algunas mediciones locales pueden verse

en Grossi et al. 2004 y Righini et al., 2005. La determinación de esta variable es esencial para conocer aspectos de gran relevancia en agricultura como la influencia de la radiación solar a nivel de superficie sobre el rendimiento de cosechas o el crecimiento de un cultivo particular, o para evaluar la evapotranspiración de una comunidad o ecosistema y determinar así la dinámica de su estado hídrico y consecuentemente su evolución en el contexto de los cambios climáticos globales.

2. RADIÓMETROS Y RADIACIÓN PAR

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 electromagnético comprendida 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 Grupo Energía Solar (GES) 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. En la Fig. 1 se muestra uno de los radiómetros elaborados en CNEA.



Fig. 1. Radiómetros fotovoltaico elaborado en CNEA.

Los radiómetros elaborados por el Grupo Energía Solar (GES) 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 filtros y capas antirreflectantes 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.

3. 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). El mismo 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 Ω cm y el proceso de difusión empleado es el propuesto por Basore et al (1994) a 870°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 mm² 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 IV 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 Fig. 2 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 tensión-corriente (Fig. 3). 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 junta y dopaje, agregar hasta 3 capas antirreflectantes, cambiar el espectro de iluminación y otras herramientas que posibilitan realizar el diseño previo del dispositivo.

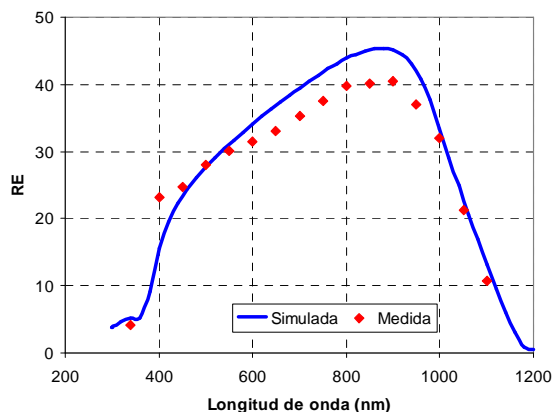


Fig. 2. Respuesta espectral medida y simulada con PCID.

En la Fig. 3 se presenta la curva IV simulada de un sensor sin filtro.

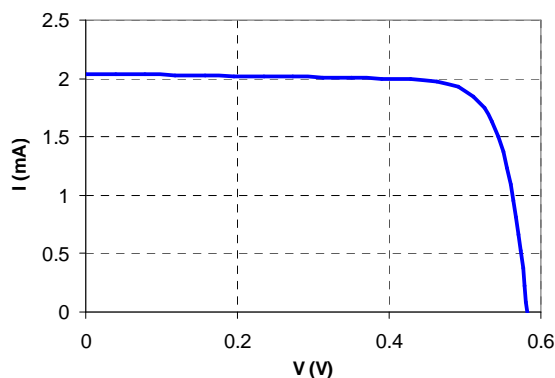


Fig. 3. Curva IV del sensor típico de un radiómetro.

4. DISEÑO DEL FILTRO ÓPTICO SOBRE VIDRIO

4.1. Determinación del número de multicapas y materiales a utilizar en el filtro

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.

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 la de diseño debido a que se ubicaba en la mitad del intervalo a considerar.

Tabla 1: Materiales dieléctricos considerados.

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

Se analizaron ocho combinaciones de multicapas de dieléctricos con índice alto y bajo cuya transmitancia se muestran en las Figuras 4 y 5. Como se puede ver existen ventajas y desventajas en cada estructura. En algunas, como las que contienen Ta_2O_5 , se ve la respuesta relativamente plana pero se aparta del intervalo de longitudes de onda de interés, ya que comienza a transmitir antes de 300nm y el corte se extiende más allá de 700nm. En otras tales como las combinaciones de Criolita y MgF_2 con TiO_2 , en cambio, en la zona de mayor transmisión existen muchas oscilaciones.

Se decide utilizar la combinación de MgF_2 y ZnS por tener una curva de transmitancia acorde con las necesidades y por ser dos materiales muy utilizados para depósitos ópticos, relativamente fáciles de depositar ya que no revisten mayores problemas en cuanto a adherencia.

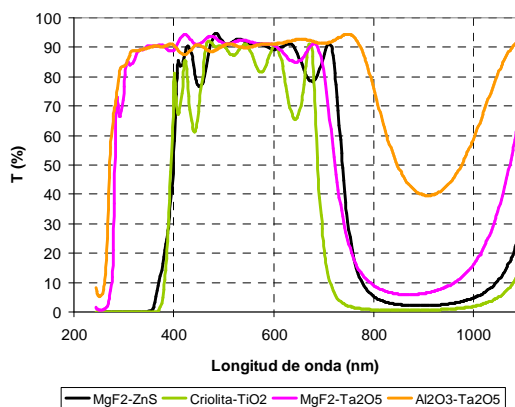


Fig. 4. Curvas de transmitancia para distintas combinaciones de materiales.

Para poner a punto la técnica de deposición de capas dieléctricas sucesivas, dado que la mayor dificultad del equipo con el que se cuenta es la cantidad de capas a depositar, se simuló la transmitancia del filtro para 3, 6, 9, 12 y 15 capas para determinar el menor número de ellas.

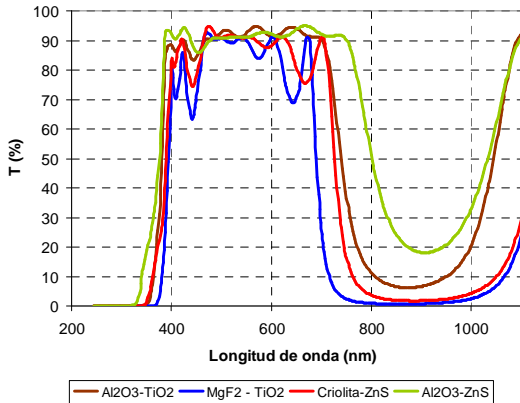


Fig. 5. Curvas de transmitancia para distintas combinaciones de materiales

En la Fig. 6 se observa como se va modificando la transmitancia a medida que se van agregando conjuntos de tricapas. A partir de 9 capas comienza a comportarse el filtro como es de esperar.

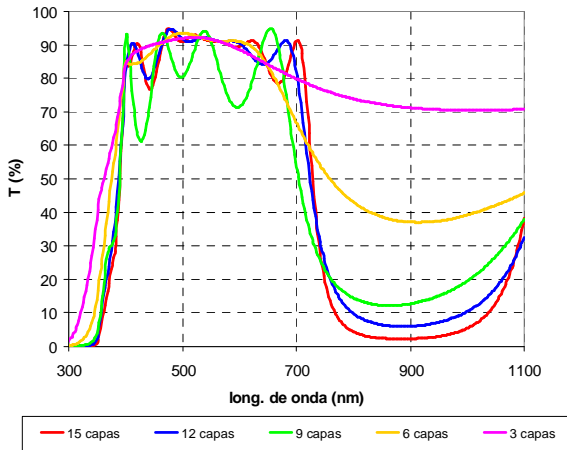


Fig. 6. Variación de la transmitancia con el número de capas depositadas.

Se calculó la corriente de cortocircuito (I_{cc}) de un sensor típico con un filtro de 12 y de 15 capas a fin de evaluar la variación en la corriente obtenida para un radiómetro con estos filtros y distinto número de capas. La I_{cc} se calculó a partir de un espectro estándar AM1.5, la transmitancia del filtro y la respuesta espectral del sensor. No se consideró el filtro de 9 capas debido a las oscilaciones que presenta y a que la caída de la transmitancia después de 700 nm es más suave. Adicionalmente, se realizó la comparación contra un “filtro ideal” definido como aquél con una transmitancia 1 entre 400 y 700 nm y 0 en el resto de las longitudes de onda. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: I_{cc} calculada para un sensor con filtro de vidrio de 12 y 15 capas

Configuración	I_{cc} (mA)
Sin filtro	2,07
Con filtro ideal	0,99
12 capas	1,09
15 capas	1,05

La diferencia entre las I_{cc} calculada y el filtro ideal es del 10% para un filtro de 12 capas y de 6% para el de 15.

4.2. Variación de la transmitancia con el ángulo de incidencia.

En general estos radiómetros son instalados en campo o invernaderos y realizan mediciones en un período de meses o durante el año, tomándose en general datos diariamente. Durante el día el sol va cambiando de posición y este tipo de instrumento queda fijo en posición horizontal ya que por ser de bajo costo no posee equipo de seguimiento. La transmitancia de los filtros ópticos varía según el ángulo de incidencia. Para ver esta variación y evaluar correctamente el error cometido durante la medición de la radiación PAR a lo largo del día, se calculó la transmitancia para un filtro de 15 capas con distintos ángulos de incidencia. Los resultados se pueden ver en la Fig. 7.

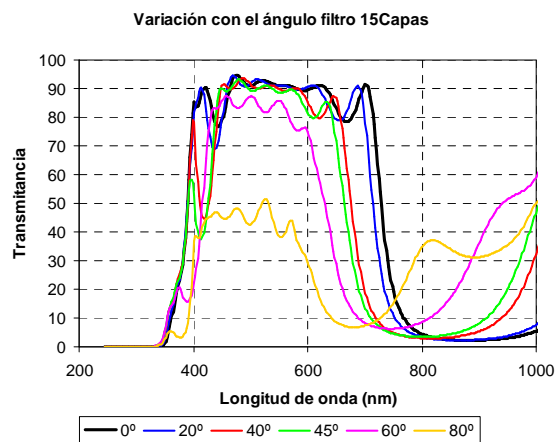


Fig. 7. Variación de la transmitancia con el ángulo de incidencia.

Teniendo en cuenta la curva de transmitancia del filtro de 15 capas para distintos ángulos (α) se realizó el mismo cálculo que para la I_{cc} denominando a cada resultado en este caso I_{α} . En la Tabla 3 se compara el valor obtenido para la simulación con distintos ángulos con el valor de $I_{cc} \times \cos\alpha$ para el filtro ideal. Puede observarse que a medida que aumenta el ángulo también aumenta la diferencia entre el cálculo con el filtro ideal y la simulación con distintas inclinaciones

Tabla 3: Cálculo de I_{α} para los distintos ángulos de incidencia simulada, para el filtro ideal y su diferencia.

Angulo α	I_{α} simulado	I_{cc} (mA) x $\cos \alpha$ Filtro ideal	Diferencia
0°	1,05	0,99	0,06
20°	1,01	0,93	0,08
40°	0,94	0,76	0,18
45°	0,93	0,70	0,23
60°	0,90	0,50	0,40
80°	0,61	0,17	0,44

4.3. Estimación del error en la deposición de las multicapas.

La deposición de las multicapas dieléctricas ya sea como capa antirreflectante sobre Si o como multicapas sobre vidrio 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 exceso y en defecto) con una distribución normal y desviaciones del 5 y del 10%, actuando esta desviación de límite máximo. En la Fig. 8 y 9 se muestran tres ejemplos de curvas de transmitancia con errores de hasta el 5 y 10% respectivamente.

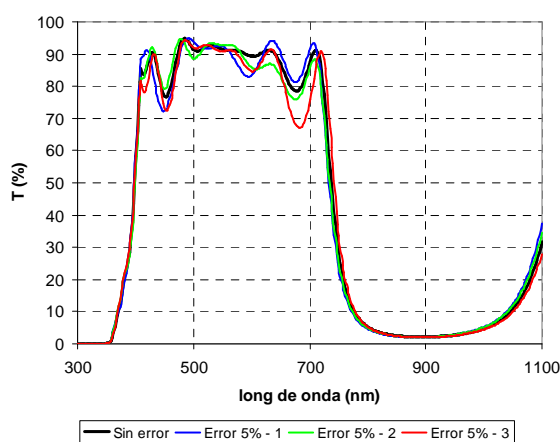


Fig. 8. Variación de la transmitancia introduciendo errores aleatorios hasta el 5% para un filtro de 15 capas.

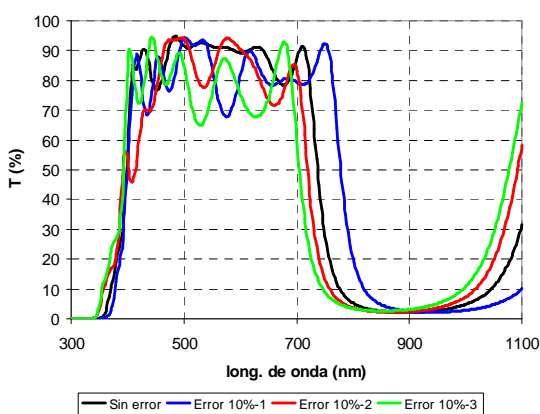


Fig. 9. Variación de la transmitancia introduciendo errores aleatorios hasta el 10% para un filtro de 15 capas.

Para realizar una evaluación, se calcula la diferencia en valor absoluto entre las áreas de las curvas simuladas con y sin las variaciones introducidas y la I_{cc} como en los casos anteriores. Como para cada valor de error máximo se tomaron varios conjuntos de números aleatorios se calculó el promedio tanto de la variación del área como de I_{cc} que se muestran en la Tabla 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4: Estimación del error introducido en el depósito de las capas.

Error máximo	10%	5%
promedios en la variación del área	9,1%	2,1%

Tabla 5: Cálculo del valor de I_{cc} para estimación del error en la deposición.

Configuración del sensor	I_{cc} (mA)
Sin filtro	2,07
Con filtro ideal	0,99
Con filtro de 15 capas	1,05
Con filtro 15 capas y error máximo del 5%	1,04
Con filtro 15 capas y error máximo del 10%	1,10

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 11%.

5. DISEÑO DE LAS CAPAS ANTIRREFLECTANTES SOBRE EL SENSOR

5.1. Estimación del número de capas

Como alternativa al filtro de vidrio y con el mismo criterio se consideraron capas dieléctricas de alto y bajo índice (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 Fig. 10 se muestran estas curvas correspondientes a un sensor sin capa AR, con 9, 12 y 15 capas, y con un filtro ideal.

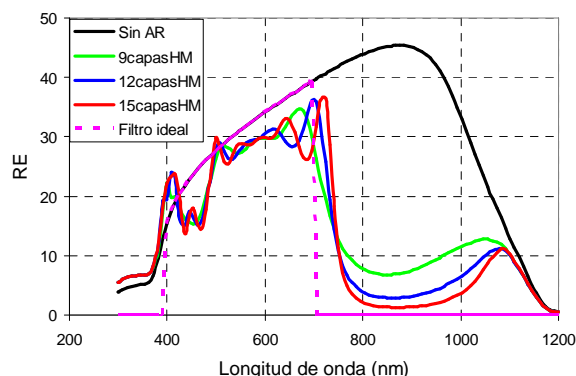


Fig. 10. Respuesta espectral simulada de un sensor sin capas antirreflectantes y con depósito de 9, 12 y 15 capas.

Se calcula I_{cc} para las configuraciones ya mencionadas de la misma manera que se realizó con los filtros, pudiéndose ver en la Tabla 6.

Tabla 6: Cálculo del valor de I_{cc} para distinto número de 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

Como en el caso de los filtros ópticos la diferencia menor con el filtro ideal se encuentra con el depósito de las 15 capas.

5.2. Elección de materiales dieléctricos

Una vez establecido el número de capas se simuló la respuesta espectral se los sensores con las capas antirreflectantes con distintas combinaciones de materiales para estudiar su comportamiento. En la Fig. 11 se muestran algunas respuestas en el intervalo de interés.

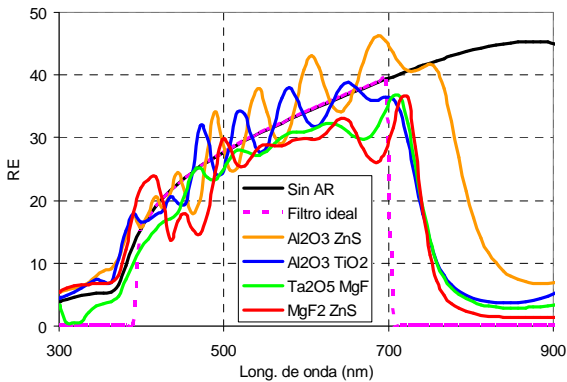


Fig. 11. Respuesta espectral simulada en el intervalo de interés de un sensor sin capas antirreflectantes y con depósitos de distintos materiales.

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 Fig. 11 y de la Tabla 7 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.

Tabla 7: Cálculo del valor de I_{cc} para las distintas combinaciones de materiales antirreflectantes.

Configuración del depósito AR	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

5.3. Variación de la respuesta espectral con el ángulo de incidencia

De la misma manera que se realizó el análisis con los filtros ópticos se estudió la variación de la respuesta del sensor con el ángulo de incidencia para las capas de $ZnS-MgF_2$. Las curvas se presentan en la Fig. 12.

Como en los casos anteriores se calculó la I_{cc} para las distintas incidencias, en este caso así como en los filtros para ángulos mayores a 45° 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 8).

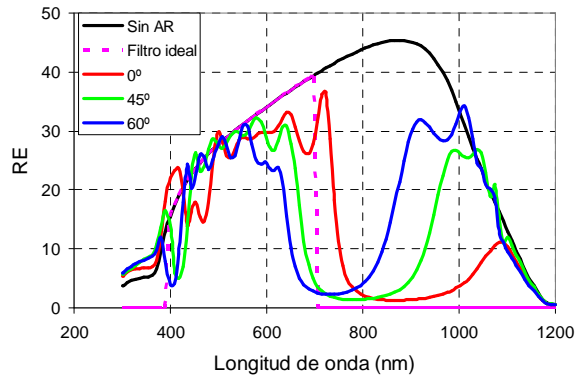


Fig. 12. Variación de la respuesta espectral con el ángulo de incidencia.

Tabla 8: Cálculo de I_{cc} para los distintos ángulos de incidencia

Angulo	I_{cc} (mA)
0°	1,05
45°	1,09
60°	1,11

6. 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.

Teniendo en cuenta la forma de la curva de transmitancia en el estudio de los filtros ópticos y de capas antirreflectantes, 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.

En la estimación del error en la deposición de las multicapas se tuvieron en cuenta diferencias de hasta un 10% (que equivalen a espesores de hasta 95nm). Estas diferencias se pueden controlar perfectamente y se estima, por experiencias previas, que en las deposiciones de estos dieléctricos el error 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

La autora agradece a Cristián Bruno y a Julio Durán por la lectura del artículo 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.
- 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., Barrera M, (2002). First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterization, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 73.
- Born M. y Wolf E. (1980) Principles of optics. 6º Edición Pergamon Press.
- Bousquet, P., Fournier 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*, **44**, 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.
- 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.
- Grossi Gallegos, H., Righini R. y Dursi. O. (2004) Primeras mediciones de la Radiación Fotosintéticamente Activa en San Miguel, Provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **8** (2), pp. 11.13-11.18.
- 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. y Grossi Gallegos H. (2005). Análisis de la correlación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en San Miguel, provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **9**, 11.01- 11.04.
- 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.