

PRIMEROS DESARROLLOS DE UN DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO PARA SU UTILIZACIÓN COMO SENSOR DE RADIACIÓN UV ^{a,b}

N. Kondratiuk, M. Martínez Bogado, M. Tamasi

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)
Departamento Energía Solar, Gerencia de Investigación y Aplicaciones, Centro Atómico
Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)
Av. General Paz 1499 (1650) San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. Tel. (011) 6772-7837,
e-mail: kondrati@tandar.cnea.gov.ar

Recibido 08/08/16, aceptado 11/10/15

RESUMEN: El Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) viene trabajando en el desarrollo y fabricación de sensores de radiación solar desde la década del 90 y son utilizados tanto para usos terrestres como espaciales. Se elaboraron y caracterizaron sensores solares de silicio cristalino que poseen una estructura n^+pp^+ , con el objetivo de modificar su respuesta espectral en la región del ultravioleta (UV) para poder utilizar estos sensores como instrumentos de bajo costo para medir radiación UV. Para ello se modificó el proceso de difusión que define la juntura frontal variando tiempos y concentración de dopante. Luego de estas modificaciones se midió la respuesta espectral de los sensores elaborados donde se obtuvieron, en una de las difusiones modificadas, sensores con una mayor respuesta en longitudes de onda bajas y en particular en la región del UV.

Palabras clave: dispositivo fotovoltaico, sensor ultravioleta, radiación solar.

INTRODUCCIÓN

Existen en Argentina distintos grupos de investigación y particulares que requieren de la medición de la radiación solar, tanto en las áreas de aplicaciones de energía solar como en arquitectura ambientalmente conciente, meteorología, agricultura, entre otras. Hasta el momento se desarrollaron en el DES de la CNEA distintos instrumentos nacionales, confiables y de bajo costo para el control y medición tanto de la radiación global como la radiación PAR (Righini et al., 2009; Tamasi y Martínez Bogado, 2013), y sensores de posición que fueron utilizados en distintas misiones satelitales tales como SAC-A, SAC-D, SAOCOM 1A, entre otras (Bolzi et al., 2013).

Disponer de la tecnología para poder fabricar sensores que midan una porción del espectro solar 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 tiene como finalidad principal el diseño, desarrollo, elaboración, y caracterización de sensores solares de silicio cristalino con el objetivo de optimizar la respuesta en el ultravioleta de dichos sensores.

Para longitudes de onda cortas (UV), el coeficiente de absorción del silicio es alto, la luz es absorbida rápidamente y la energía se pierde por vibraciones en la red (interacción con fonones). Este tipo de radiación contribuye muy poco a la fotocorriente ya que los portadores de carga no alcanzan la juntura (Green, 1986), por lo que el sensor presenta baja respuesta espectral. Así, la respuesta para longitudes de onda cortas depende de las propiedades y características de la cara frontal de la celda solar. Es por

^a Proyecto parcialmente financiado por el PICT 2013-0063

^b Proyecto parcialmente financiado por el PIP 00319CO

esto que es necesario modificar el proceso de difusión que define la juntura frontal (n^+p) utilizado en el laboratorio fotovoltaico del DES. Si se logra obtener una unión n^+p poco profunda y hay menos impurificación n^+ se reduce la recombinación (Green, 1986), y por lo tanto se mejora la respuesta espectral en bajas longitudes de onda. Esto es lo que se tuvo en cuenta para la optimización de la respuesta de los sensores en la región del ultravioleta. Además un emisor menos dopado lleva asociado menores velocidades de recombinación superficiales.

El proceso de elaboración de los sensores de silicio involucró limpiezas, formación de las juntas y el empleo de técnicas fotolitográficas para deposición de contactos metálicos. Se difundieron obleas comerciales de silicio cristalino tipo p marca Siemens de resistividad $1 \Omega\text{cm}$, de 10 cm por 10 cm de lado obtenidas con el método Czochralski. Se creó una estructura n^+pp^+ por difusión en un paso. En este proceso se crean las juntas n^+p y pp^+ simultáneamente (Tamasi, 2003). Se disminuyeron los tiempos predeposición, recocido, oxidación y *drive-in*, ya que esto debería disminuir la profundidad de juntura frontal y la concentración del dopante tipo n, y por lo tanto, lograr una mayor respuesta espectral (RE) en el UV. La primera modificación fue reducir el tiempo de oxidación, recocido y *drive-in* (difusión 343). Luego, en una posterior difusión, se procedió a disminuir también el tiempo de predeposición de fósforo (difusión 344).

CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA: CURVA CORRIENTE - TENSIÓN

En condiciones normalizadas según la Norma Argentina IRAM 210013-2 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2015) se midió la curva corriente-tensión (I-V) de los sensores con control de temperatura y una irradiancia equivalente a 1000 W/m^2 . En la Figura 1 se muestran las curvas I-V de algunos sensores fabricados correspondientes a la difusión estándar (proceso 341). Se puede observar una gran similitud entre las curvas, pudiendo concluir que el proceso de elaboración de los sensores es confiable en cuanto a la repetitividad de las características eléctricas logradas. Esto también se puede notar en la Tabla 1 donde se encuentra el valor de la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}) y el factor de forma (FF) de los sensores. El valor estimado para el error de la I_{cc} es del 4 %, para la V_{ca} del 0,08 % y para el FF del 5 %.

Sensor	I_{cc} (mA)	V_{ca} (mV)	FF
341-02	$22,1 \pm 0,9$	551 ± 4	$0,75 \pm 0,04$
341-03	$22,1 \pm 0,9$	545 ± 4	$0,73 \pm 0,04$
341-07	$22,6 \pm 0,9$	553 ± 4	$0,73 \pm 0,04$

Tabla 1. Valores obtenidos de los parámetros eléctricos con la medición de la curva corriente-tensión para sensores fabricados con difusión estándar.

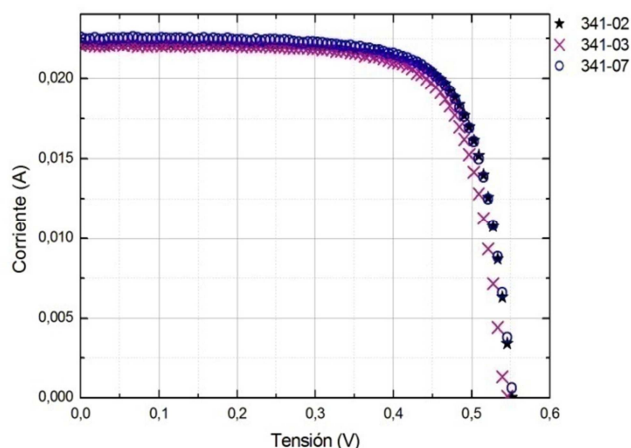


Figura 1. Curvas corriente-tensión de los sensores con difusión 341, medidas con espectro AM1.5.

En la Figura 2 se muestran las curvas I-V de algunos sensores correspondientes a las difusiones modificadas (343 y 344). Cabe destacar que las curvas obtenidas son similares entre ellas.

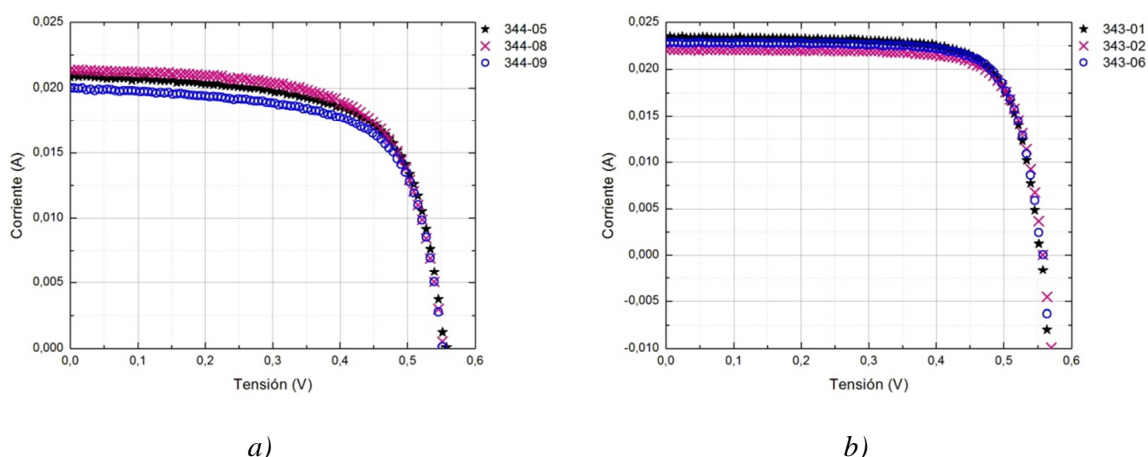


Figura 2. Curvas corriente-tensión de los sensores elaborados correspondientes a la difusión 343 (a) y 344 (b).

En la Tabla 2 se encuentra el valor de la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}) y el factor de forma (FF) de los sensores elaborados. Se observa que en los sensores de la difusión 344, el FF ha empeorado en comparación a los sensores con difusión 341 (Tabla 1) y 343; esto se puede deber a un aumento de la resistencia serie (Green, 1986), posiblemente debido a un aumento de la resistencia de capa del emisor al haber disminuido demasiado la concentración de fósforo, ya que una mayor resistencia de capa está asociada con un menor dopado y viceversa.

Sensor	I_{cc} (mA)	V_{ca} (mV)	FF
343-01	$23,3 \pm 0,9$	554 ± 4	$0,75 \pm 0,04$
343-02	$22,1 \pm 0,8$	558 ± 4	$0,77 \pm 0,04$
343-06	$22,8 \pm 0,9$	558 ± 4	$0,76 \pm 0,04$
344-05	$20,8 \pm 0,8$	557 ± 4	$0,67 \pm 0,03$
344-08	$21,3 \pm 0,8$	554 ± 4	$0,67 \pm 0,03$
344-09	$20,0 \pm 0,8$	551 ± 4	$0,67 \pm 0,03$

Tabla 2. Valores obtenidos de los parámetros eléctricos con la medición de la curva corriente-tensión para sensores con difusiones modificadas.

CARACTERIZACIÓN ELECTRÓNICA: RESPUESTA ESPECTRAL

Para la medición de la respuesta espectral (RE) se empleó un equipo diseñado y fabricado en el DES que cumple con la norma IRAM 210013-14 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2000). Las curvas de las respuestas espectrales medidas correspondientes a los sensores con difusión estándar se pueden observar en la Figura 3. El error estimado asociado a la medición de la respuesta espectral con este equipo, resulta en una dispersión menor al 3 % para las longitudes de onda (λ) donde responden los sensores.

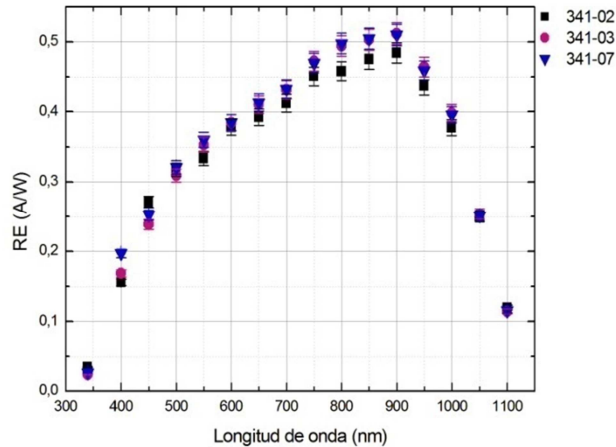


Figura 3. Curvas de respuesta espectral medidas correspondientes a los sensores con difusión modificada 341 con sus barras de error.

Si bien hay una clara similitud entre las curvas de RE obtenidas, la diferencia entre ellas se puede deber a que los sensores no poseen la misma área activa, ya que en el proceso de fotolitografía se obtuvieron sensores con áreas ligeramente diferentes, pudiendo ser esto lo que determinó que las curvas de RE no sean las mismas. También, puede estar relacionado al perfil de difusión obtenido, determinando que la profundidad de la juntura n^+p varíe levemente entre sensores, lo que es común en este tipo de procesos. Además puede haber una inhomogeneidad en lo que respecta a la estructura pp^+ de los sensores. Sin embargo se puede corroborar que la forma de las curvas se corresponde a la curva teórica de respuesta espectral (Green, 1986), y se concluye que en el proceso de difusión de un paso se obtienen características electrónicas suficientemente uniformes entre sensores.

La respuesta espectral de los sensores correspondientes a las difusiones 343 y 344, se muestran en la Figura 4. Es notoria la repetitividad de la forma de la RE de los sensores.

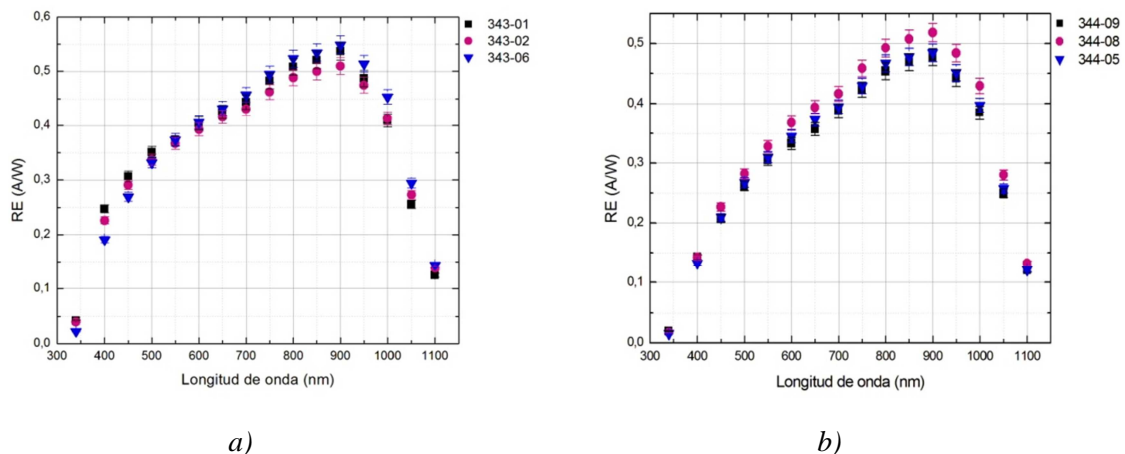


Figura 4. Curvas de respuesta espectral medidas correspondientes a los sensores con difusión modificada 343 (a) y 344 (b) con sus barras de error.

Ya que se conserva la forma de la curva de RE de los sensores correspondientes a las tres difusiones realizadas, se verifica que los dispositivos mantienen características electrónicas similares, y esto se debe a que el cambio en la difusión no fue sustancial, ya que se elaboró el mismo tipo de juntura y se mantuvieron invariantes varios parámetros. A continuación se encuentra una comparación de las RE

de los sensores con difusión estándar (341) con sensores con difusión 343 y 344, en los gráficos de las Figura 5.

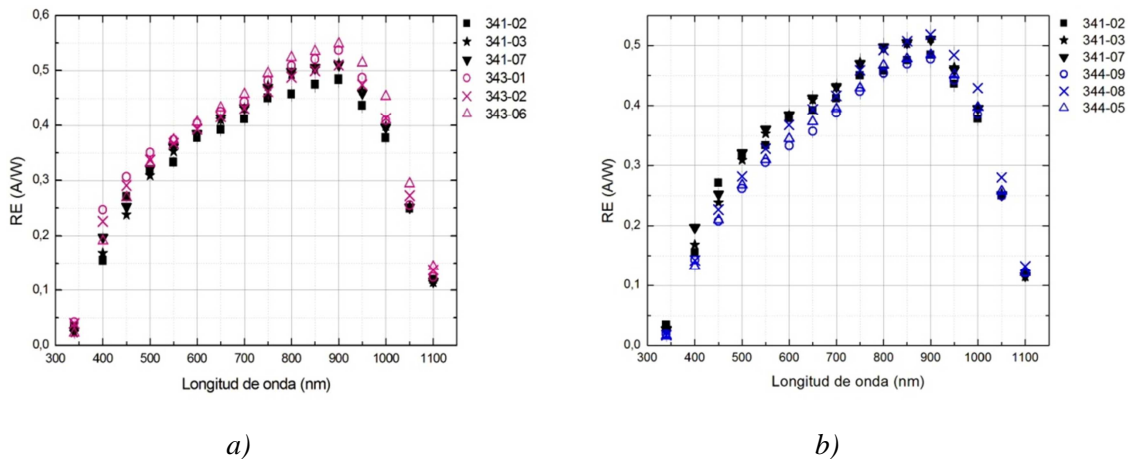


Figura 5. Respuesta espectral de los sensores con difusiones 341 y 343 (a), y 341 y 344 (b).

Se observa que algunos sensores de la difusión 343 tienen una mayor respuesta espectral comparada con la de los dispositivos con difusión estándar (341). Esta diferencia se hace más notoria en longitudes de onda bajas, a partir de los 450 nm para los sensores 343-01 y 343-02. Luego, para λ igual 340 nm, la RE de estos sensores vuelve a ser levemente diferente por la escala del gráfico, pero sigue siendo mayor.

Por el contrario, los sensores correspondientes a la difusión 344, tienen una respuesta espectral menor en bajas longitudes de onda. Esto último no es lo esperado ya que esta difusión implicó una menor predeposición de fósforo, lo cual debería conllevar una mayor RE que la de los sensores de las otras difusiones, al haber disminuido la probabilidad de recombinación de los portadores fotogenerados. Es probable que la disminución de impurezas en la zona n^+ resultó en un empeoramiento del contacto óhmico frontal debido a que la baja concentración de impurezas causa una resistencia de contacto elevada, correspondiéndose a lo observado en el FF de la curva I-V de los sensores 344 (Tabla 2), ya que el dopaje también se relaciona con la resistencia de capa del emisor. Un correcto dopaje implica que se reduzca la barrera de potencial entre el semiconductor y el metal o se haga muy estrecha, logrando una buena conducción. Se debe tener en cuenta que el tiempo de predeposición de fósforo fue un 60 % menor que el correspondiente a la difusión estándar, esto permite considerar que se puede encontrar el valor óptimo de concentración de impurezas en una futura difusión, o bien considerar un método de difusiones localizadas, donde se tendrá una región n^{++} debajo del dedo metálico para formar un buen contacto óhmico.

Como se mencionó anteriormente la diferencia de tamaño entre sensores y el perfil de difusión, entre otras cosas, implica que las RE difieran entre sensores de una misma difusión, lo que dificulta una adecuada comparación entre sensores de diferentes difusiones. Para poder analizar si hubo un cambio en la respuesta espectral de los sensores para bajas longitudes de onda, se compararon RE de sensores de diferentes difusiones (Figura 6), que tienen una marcada similitud en las longitudes de onda correspondientes al visible e infrarrojo, con el fin de ver si había un cambio de la RE para bajas longitudes de onda.

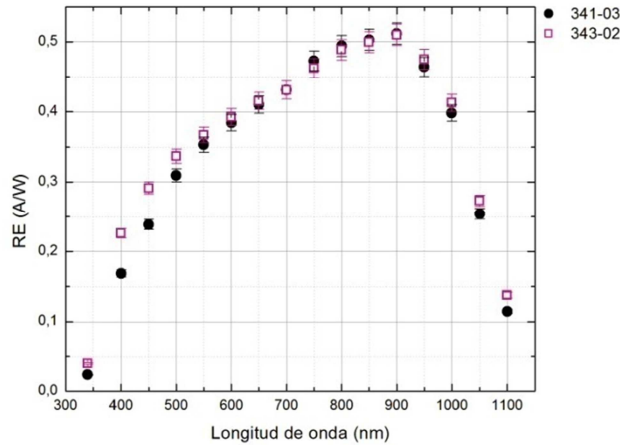


Figura 6. Respuesta espectral de los sensores 341-07 y 343-02 con sus barras de error.

Se puede notar que el sensor 343-02 tiene una mayor respuesta que el sensor 341-03 en bajas longitudes de onda, a partir de los 500 nm. Para λ igual a 400 nm hay un aumento del 35 % de la respuesta espectral, y en los 340 nm es del 67 %.

CONCLUSIONES

Es de suma importancia disponer de la tecnología para poder fabricar radiómetros que midan una porción específica del espectro permitiendo adecuar el instrumento a cada necesidad en cuanto a medición de radiación solar. El trabajo constituyó los primeros pasos del desarrollo de sensores fotovoltaicos de radiación ultravioleta (UV), tanto en lo que se refiere al diseño y elaboración de los dispositivos de silicio cristalino cuanto a la caracterización de los mismos.

Para la obtención de la estructura n^+pp^+ se evaporó una capa superficial de aluminio en cámara de alto vacío en las muestras. Se realizó la difusión de un paso de aluminio y fósforo, la cual demostró, en investigaciones anteriores realizadas por el DES-CNEA, ser el proceso óptimo tanto para la fabricación de celdas como sensores convencionales. La puesta a punto del proceso de difusión es esencial para poder controlar características de los sensores solares de silicio cristalino tales como dopaje y resistencia de capa del emisor frontal, y la profundidad de juntura. Se realizó una difusión estándar (341) que se utiliza en el DES para la fabricación de radiómetros terrestres y sensores gruesos de posición para aplicaciones espaciales. Posteriormente se llevaron a cabo dos difusiones cuyos parámetros fueron modificados (343 y 344) disminuyendo los tiempos de predeposición, recocido, oxidación y *drive-in*, con el objetivo de disminuir la profundidad de la juntura frontal.

Los sensores elaborados fueron caracterizados eléctrica y electrónicamente concluyendo que ambas se encuentran en buen acuerdo. Se realizó una comparación de las respuestas espectrales de sensores de distintas difusiones y se observó que las curvas de respuesta espectral (RE) mantienen la misma forma por lo que no hubo un cambio radical en las características electrónicas para los dispositivos de las diferentes difusiones. A pesar de la inhomogeneidad del perfil de difusión, característica de este proceso, se obtuvieron sensores de la difusión 343 que presentan mayor respuesta en intervalo de longitudes de onda correspondiente al ultravioleta.

Las actividades de caracterización realizadas permitieron evaluar y verificar la confiabilidad y repetitividad de las diversas técnicas relacionadas con la elaboración de los dispositivos electrónicos.

La intención a futuro es lograr un proceso de difusión que optimice la profundidad de juntura; para tal fin se procederá a variar el caudal de los gases así como las temperaturas de las distintas etapas del proceso. También se continuará variando los tiempos de recocido, oxidación y *drive-in*, y por el contrario, por el momento, la predeposición de fósforo permanecerá como en la difusión estándar, debido a que no se han obtenido resultados favorables con la difusión 344.

Se realizarán reformas en el equipo de respuesta espectral con el fin de obtener valores confiables para longitudes de onda menores a 340 nm. A futuro se prevé la utilización de materiales y técnicas de depósito de películas dieléctricas sobre el sensor para recortar y adecuar la respuesta espectral en el UV, así como la incorporación de filtros ópticos de cuarzo para implementar el sensor en campo.

REFERENCIAS

- Bolzi C., Martínez Bogado M. G. y Tamasi M. J. L. (2013). Reseña del Desarrollo de Sensores Solares en CNEA para Misiones Satelitales. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 31, pp. 29-36.
- Green M. A. (1986). *Solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. University of New South Wales, Australia.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2015). Norma Argentina IRAM 210013-2: Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2000). Norma Argentina IRAM 210013-12: Método normalizado para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas.
- Righini R., Gallegos H. G., Bolzi C. G., Bogado M. M. y Tamasi M. J. L. (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.
- Tamasi M. J. (2003). *Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización*. Universidad Nacional de General San Martín. República Argentina.
- Tamasi M. J. L. y Bogado M. M. (2013). A theoretical approach to photosynthetically active radiation silicon sensor. *Thin Solid Films*, 534, 497-502.
- Toranzos V., Tamasi M., Bogado M., Firman A. y Busso A. (2012). Determinación de la profundidad de juntura en celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, pp. 04.25-04.30.

ABSTRACT

The Solar Energy Department (DES) of the National Commission Atomic Energy (CNEA) has been working in the development and manufacture of solar radiation sensors since the 90s and they are used for both terrestrial and space applications. It was developed and characterized silicon solar sensors has structure n^+pp^+ with the objective of modify their ultraviolet (UV) region spectral response for using these sensors as low-cost tools to measure UV radiation. It was modified the diffusion process that defines the front junction varying times and dopant concentration. After these modifications, it was measured the spectral response of the developed sensors. In one of the modified diffusions, sensors were obtain with a greater response in lower wave's lengths particularly in the UV.

Keywords: photovoltaic device, ultraviolet sensor, solar radiation.