

MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE UN DISPOSITIVO FOTVOLTAICO PARA SU UTILIZACIÓN COMO SENSOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

N. Y. Kondratiuk, M. J. L. Tamasi, M. G. Martínez Bogado

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Departamento Energía Solar - Gerencia de Investigación y Aplicaciones - Centro Atómico Constituyentes -
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: kondrati@tandar.cnea.gov.ar, www.tandar.cnea.gov.ar

Recibido:30-6-2016; Aceptado:31-7-2016.

RESUMEN.- 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. El Departamento 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 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 n^+p 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 claves: dispositivo fotovoltaico, sensor ultravioleta, radiación solar.

MODIFICATION OF THE SPECTRAL RESPONSE OF A PHOTOVOLTAIC DEVICE FOR USE AS UV RADIATION SENSOR

ABSTRACT.- There are different research groups and privates who require the measurement of solar radiation, both in the areas of applications of solar energy and conscious environmental architecture, meteorology, agriculture, among others in Argentina. The Solar Energy Department (DES) of the National Atomic Energy Commission (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. So far they were developed different national, reliable and low-cost instruments for control and measurement of both the global radiation and PAR radiation, and position sensors which were used in different satellite missions such as SAC-A, Aquarius/SAC-D, SAOCOM 1A, among others. It was developed and characterized silicon solar sensors 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: ultraviolet sensor, sun sensor, photovoltaic device.

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores fotovoltaicos pueden utilizarse en cualquier situación donde la excitación de entrada sea radiación luminosa en el intervalo de longitudes de onda donde éstos son sensibles, entregando a la salida una señal eléctrica. En particular, en su utilización terrestre, los sensores fotovoltaicos están muy difundidos para la medición de radiación solar debido a su bajo costo comparado con sensores termoelectricos como los piranómetros cuyo funcionamiento está basado en termopilas (Bolzi, 2002).

Hasta el momento en el DES de la CNEA, se desarrollaron 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).

Los radiómetros fotovoltaicos poseen como elemento sensible un semiconductor, como por ejemplo un fotodiodo o una celda de silicio, que al recibir un flujo radiante genera

una corriente proporcional a la irradiancia recibida la que, al circular por una resistencia de carga, genera una diferencia de potencial; esta respuesta no es plana sino selectiva, dependiendo de la longitud de onda de la radiación.

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.

La aplicación de estos sensores es muy amplia: desde usos en grupos de investigación de biología hasta aplicaciones en zonas de alta radiación UV, como la región de la Puna Salteña (4000 m 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. Los mapas de la Figura 1 muestran el pronóstico de la ISUV (máxima Intensidad de Radiación Solar Ultravioleta) y la ISUVn (mínima Intensidad de Radiación Solar Ultravioleta), correspondiente al mediodía solar del día de la fecha que se indica en la imagen (siendo éste el período del día en que se registra el valor más alto de la radiación solar ultravioleta). La ISUV-ISUVn da indicación del riesgo de sobreexposición al Sol, con valores y calificaciones que son correlacionados con el tiempo mínimo en minutos necesarios de exposición a los rayos solares para producir enrojecimiento (y eventualmente quemadura) de la piel (Servicio Meteorológico Nacional, 2016).

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), no son puestas totalmente en práctica debido a falta de información y a que no existe obligacion 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.*, 2014). La importancia de estos estudios radica en investigar las diferencias en exposiciones personales reales, en lugar de irradiación solo en un plano horizontal.

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 ello es necesario modificar el proceso de difusión que define la juntura frontal (n^+p) utilizado en el laboratorio fotovoltaico del DES-CNEA.

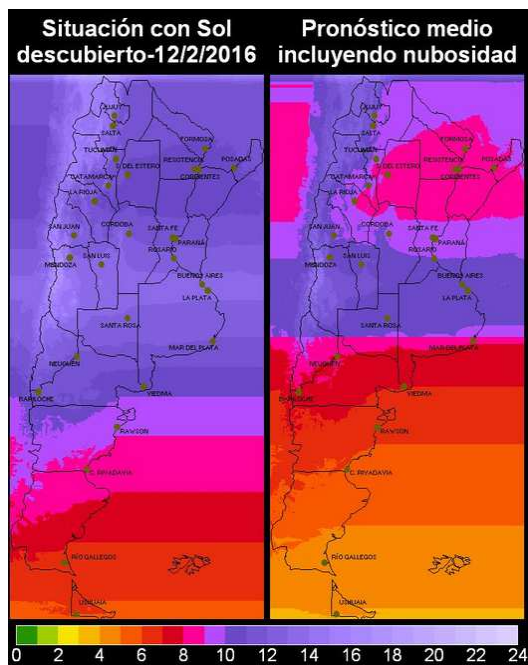


Fig. 1. Pronóstico de la ISUV-ISUVn, correspondiente al mediodía solar. En particular, el intervalo 10-14 indica riesgo muy alto y de 14 en adelante implica riesgo extremo (Servicio Meteorológico Nacional, 2016).

2.- ELABORACIÓN DE LOS SENSORES

El proceso de elaboración de los sensores de silicio involucró limpiezas, formación de las junturas 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 Ωcm , 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 junturas n^+p y pp^+ simultáneamente.

Como las obleas ya están dopadas con un tipo de impureza (con boro), es necesario hacer lo que se denomina difusión de una impureza del otro tipo, en este caso tipo n, creando así la juntura n^+p . Como se quiere que las celdas también posean un emisor p^+ , o sea una región más dopada que la oblea para formar el emisor posterior, se realiza una evaporación previa por efecto Joule de una capa de aluminio (dopante tipo p) de alta pureza previamente a la difusión.

En base a experiencias y a las mejoras implementadas en el laboratorio, el proceso de difusión que se está utilizando actualmente en el DES, para la elaboración de radiómetros y sensores gruesos de posición, es el que se muestra en la Tabla 1 (Tamasi, 2003). Este es un proceso de difusión en un paso con *drive-in* en N_2 .

Tabla 1. Parámetros del proceso de difusión estándar de un paso.

Etapa	N ₂ (l/min)	O ₂ (l/min)	POCl ₃ %	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
Predeposición de P	0,5	7	0,4	5	890
Baño en N₂	7	0,5	-	5	890
Oxidación	0,5	7	-	15	890
Drive-in	7	0,5	-	90	890

A continuación se detallan los pasos mas relevantes del proceso de difusión.

1. Predeposición de P en ambiente de O₂ (7 l/min) por burbujeo de N₂ a través de la fuente de POCl₃ con alta concentración de dopante (típicamente 0,4 %). La duración de este paso es de 5 min a una temperatura de 890°C.
2. Recocido en ambiente de N₂ (7 l/min) durante 5 minutos (baño de N₂) como paso posterior a la predeposición y a la misma temperatura, sin extraer las obleas del horno. En este paso el P depositado en el fósforo silicato se distribuye sobre la superficie de la oblea de Si.
3. Recocido y oxidación en ambiente de O₂ (7 l/min), durante 15 minutos a la misma temperatura. En este paso se forma el óxido y comienza la redistribución de impurezas.
4. *Drive-in* en ambiente de N₂ (7 l/min) durante 90 minutos. En este paso se realiza la redistribución de las impurezas.

2.1. Modificación del proceso de difusión de dopantes.

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 estos pares 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.

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 tendrá 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.

Con el fin de elaborar de sensores con mayor respuesta espectral en el UV se realizaron variaciones en los parámetros del proceso de difusión que definen la profundidad de juntura. Específicamente 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).

A continuación, en la Tabla 2, se detallan las modificaciones en los tiempos de difusión comparándolos con los correspondientes a la difusión estándar (341).

Tabla 2. Tiempos (min) del proceso de difusión estándar (341) y de difusiones modificadas (343 y 344).

Difusión	Predeposición	Baño en N ₂	Recocido y oxidación	Drive-in
341	5	5	15	90
343	5	5	15	75
344	2	5	5	75

Para la deposición de los contactos metálicos se evaporó en cámara de alto vacío una multicapa de Ti-Pd-Ag. Se engrosaron electroquímicamente para lograr un espesor apropiado para la soldadura de los interconectores y se realizó el sinterizado de los contactos en ambiente de una mezcla de H₂-N₂ a 400 °C.

3.- CARACTERIZACIÓN

3.1. Caracterización eléctrica: curva corriente-tensión.

En condiciones normalizadas según la Norma Argentina IRAM 210013-2 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2016) se midió la curva corriente-tensión (I-V) de los sensores con control de temperatura y una irradiancia equivalente a 1000 W/m². En la Figura 2 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 3 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 V_{ca} del 0,08 % y para el FF del 5 %.

Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros eléctricos con la medición de la curva corriente-tensión para sensores fabricados con difusión estándar.

Sensor	I _{cc} (mV)	V _{ca} (mV)	FF
341-02	22,1 ± 0,9	551 ± 4	0,75 ± 0,04
341-03	22,1 ± 0,9	545 ± 4	0,73 ± 0,04
341-07	22,6 ± 0,9	553 ± 4	0,73 ± 0,04

En las Figuras 3 y 4 se muestran las curvas I-V de algunos sensores correspondientes a las difusiones modificadas (343 y 344) respectivamente. Cabe destacar que las curvas obtenidas son similares entre ellas.

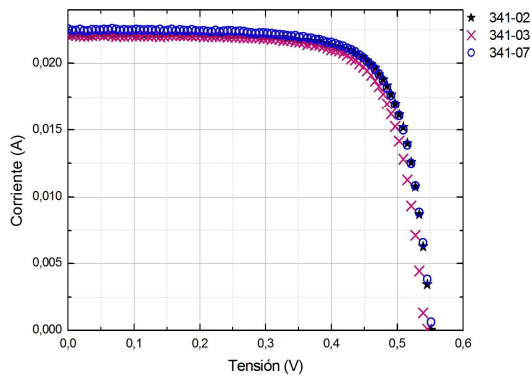


Fig. 2. Curvas corriente-tensión de los sensores con difusión 341, medidas con espectro AMI.5.

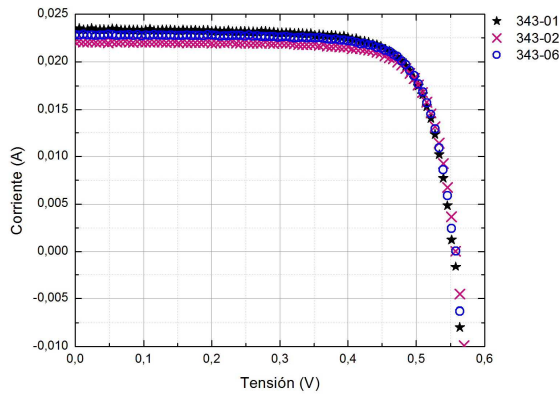


Fig. 3. Curvas corriente-tensión de los sensores elaborados correspondientes a la difusión 343.

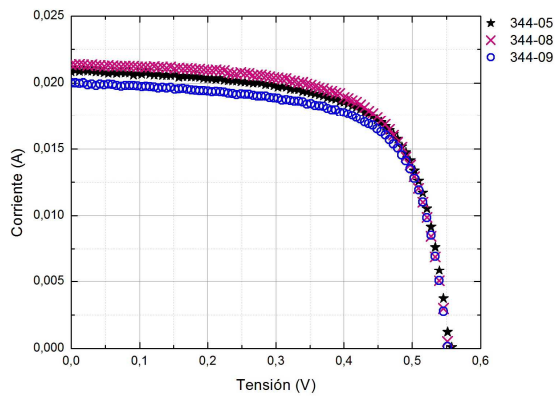


Fig. 4. Curvas corriente-tensión de los sensores elaborados correspondientes a la difusión 344.

En la Tabla 4 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. Se observa que en los sensores de la difusión 344, el FF ha empeorado en comparación a los sensores con difusión 341 (Tabla 3) 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.

Tabla 4. Valores obtenidos de los parámetros eléctricos con la medición de la curva corriente-tensión para sensores con difusiones modificadas.

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	$0,67 \pm 0,03$

3.2. Caracterización electrónica: respuesta espectral

Para la medición de la respuesta espectral se empleó un equipo diseñado y fabricado en el DES que cumple con la norma IRAM Argentina 210013-12 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2013). Las curvas de las respuestas espectrales medidas correspondientes a los sensores con difusión estándar se pueden observar en la Figura 5. 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 donde responden los sensores.

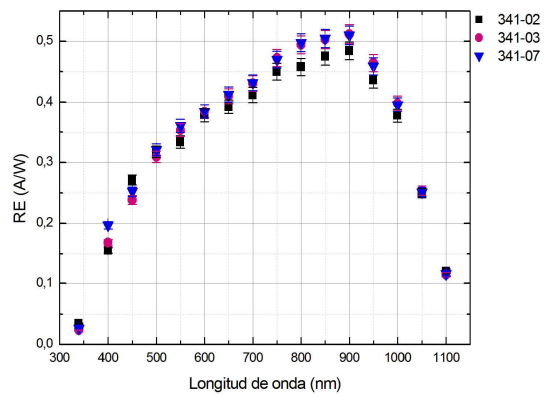


Fig. 5. Curvas de respuesta espectral medidas correspondientes a los sensores con difusión modificada 341 con sus barras de error.

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 las Figuras 6 y 7

respectivamente. Es notoria la repetitividad de la forma de la RE de los sensores.

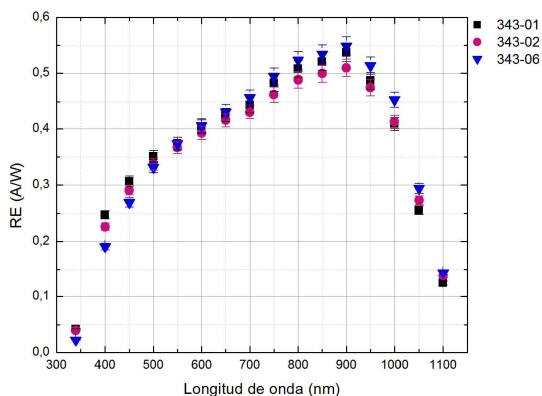


Fig. 6. Curvas de respuesta espectral medidas correspondientes a los sensores con difusión modificada 343 con sus barras de error.

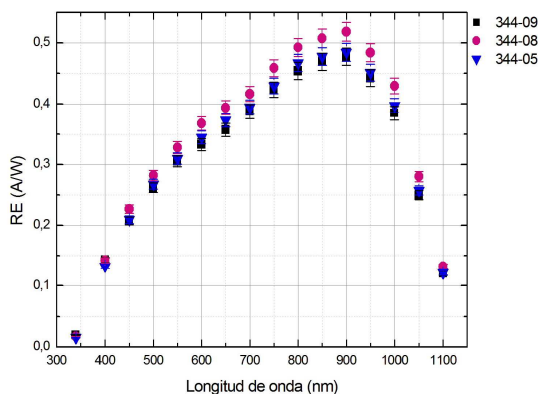


Fig. 7. Curvas de respuesta espectral medidas correspondientes a los sensores con difusión modificada 344 con sus barras de error.

Tabla 5. Valores obtenidos de la corriente de cortocircuito con la medición de la curva corriente-tensión y calculados a partir de la respuesta espectral, para sensores con difusión 341, 343 y 344.

Sensor	I _{cc} (mA) (curva I-V)	I _{cc} (mA) (curva RE)
341-02	22,1 ± 0,9	19,8 ± 0,6
341-03	22,1 ± 0,9	20,4 ± 0,8
341-07	22,6 ± 0,9	20,7 ± 0,8
343-01	23,3 ± 0,9	21,9 ± 0,7
343-02	22,1 ± 0,8	21,2 ± 0,6
343-06	22,8 ± 0,9	21,9 ± 0,7
344-05	20,8 ± 0,8	18,7 ± 0,6
344-08	21,3 ± 0,8	19,9 ± 0,6
344-09	20,0 ± 0,8	18,3 ± 0,6

Se calculó la corriente de cortocircuito a partir de la curva de respuesta espectral y se lo comparó con el obtenido con la curva I-V. En la Tabla 5 se presentan los resultados, y se verifica que este método es una herramienta para corroborar que la medición de las propiedades electrónicas se realizó correctamente dándonos un estimativo de la corriente de

cortocircuito. Se concluye que los valores obtenidos en el cálculo de I_{cc} a partir de la caracterización electrónica se encuentran en buen acuerdo con aquellos obtenidos mediante la curva I-V.

En la Figura 8 se encuentran las respuestas espectrales de los sensores de las tres difusiones realizadas. Ya que se conserva la forma de la curva 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.

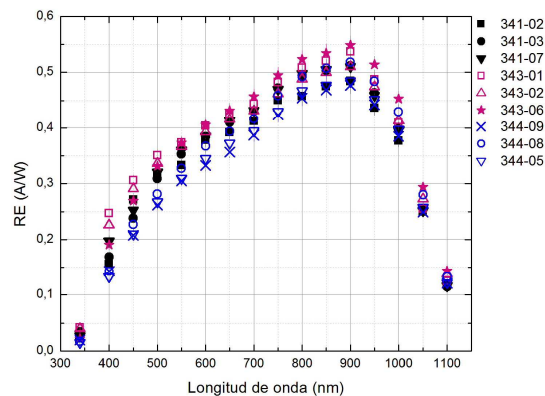


Fig. 8. Curvas de respuesta espectral de los sensores con difusión estándar (341) y difusiones modificadas (343 y 344) con sus barras de error.

Para tener una visualización mas clara 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 Figuras 9 y 10 respectivamente.

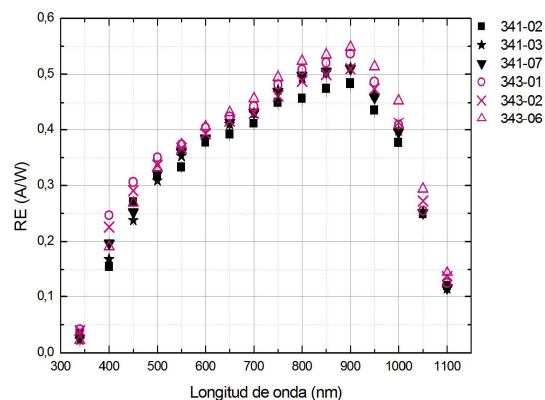


Fig. 9. Respuesta espectral de los sensores con difusiones 341 y 343.

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 (λ) 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.

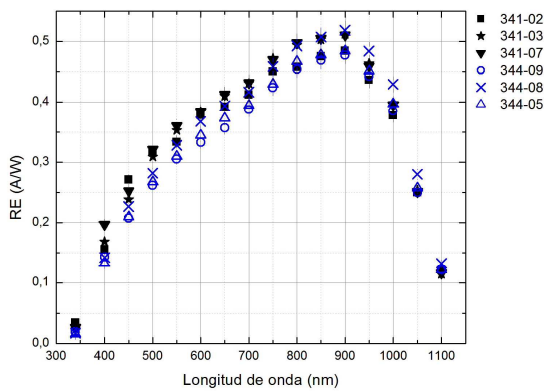


Fig. 10. Respuesta espectral de los sensores con difusiones 341 y 344.

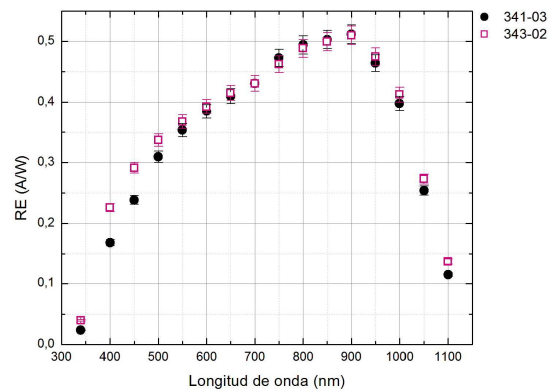


Fig. 11. Respuesta espectral de los sensores 341-07 y 343-02 con sus barras de error.

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 4), 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 11), 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.

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 %.

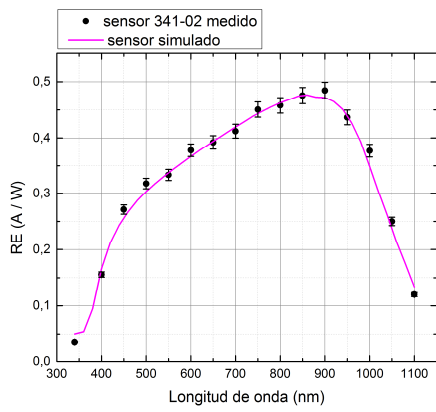
3.3 Simulaciones numéricas.

El PC-1D-5 es un programa de simulación unidimensional de dispositivos semiconductores que resuelve numéricamente las ecuaciones de transporte de electrones y huecos. Se realizaron simulaciones de las respuestas espectrales (RE) de los sensores elaborados variando parámetros. Las curvas simuladas de RE correspondientes a los sensores de las difusiones 341 (estándar) y 343 se encuentran en la Figura 12 y 13 respectivamente. La diferencia entre curvas simuladas y medidas en los 340 nm se debe a que el programa no simula correctamente en longitudes de onda bajas, y además puede ser que la RE medida tenga más error. Se puede ver que las respuestas espectrales simuladas son comparables las curvas experimentales. Esto permite tomar el valor de la profundidad de la juntura n^+p dado por el programa y poder decir que es confiable, al menos como un estimativo. El dopaje superficial (tipo n) en las simulaciones se mantuvo del orden de 10^{20} át/cm³ y se utilizó un perfil de difusión gaussiano.

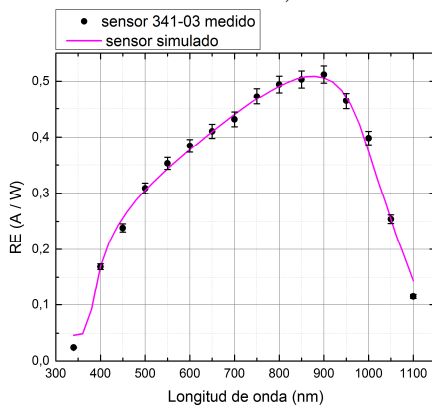
En la Tabla 6 se encuentran los valores obtenidos para la profundidad de juntura del emisor frontal para los sensores simulados. Se observa que para los sensores de la difusión 343, la profundidad de juntura es igual o menor (hasta un 75 %) que en los sensores 341 (difusión estándar). A futuro se contrastarán los datos de profundidad de juntura obtenidos en las simulaciones con la medición de la profundidad de juntura (Tornazos *et al.*, 2012).

Tabla 6. Valores de profundidad de juntura obtenidos con las simulaciones realizadas de la respuesta espectral de los sensores caracterizados.

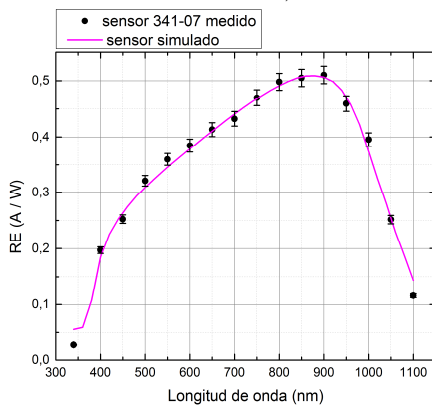
Sensor	Profundidad de juntura (μm)
341-02	0,23
341-03	0,24
341-07	0,19
343-01	0,06
343-02	0,06
343-06	0,19



a)



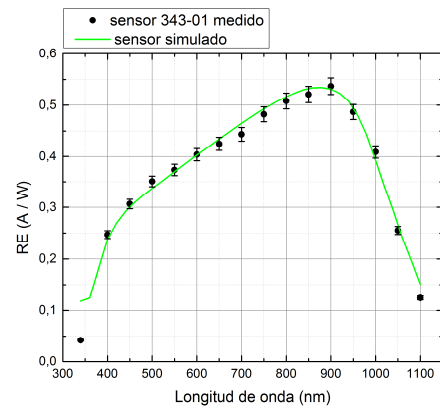
b)



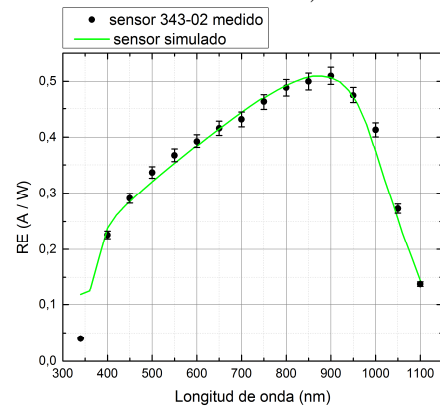
c)

Fig. 12. Simulaciones obtenidas con el PC-1D-5 para la respuesta espectral de sensores con difusión 341 (estándar): sensor 02 (a), sensor 03 (b) y sensor 07 (c).

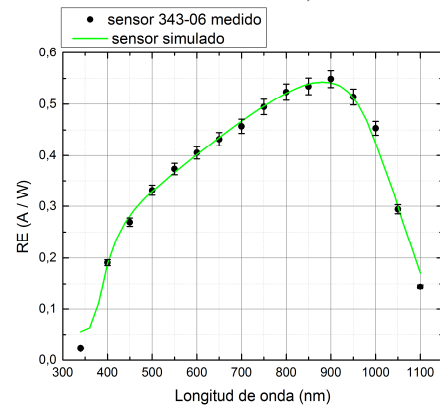
Las comparaciones entre curvas de RE de las difusiones realizadas y las respectivas simulaciones obtenidas, nos indica que el camino a seguir en cuando a modificación de la difusión, es variar los tiempos de recocido, oxidación y *drive-in*, así como se hizo en la difusión 343, y por el contrario mantener invariante o modificar levemente el tiempo de predeposición de fósforo. Se prevé también realizar nuevas difusiones variando parámetros de las etapas críticas de la formación de la juntura frontal como lo son el caudal de los gases utilizados así como también la temperatura del proceso.



a)



b)



c)

Fig. 13. Simulaciones de la respuesta espectral obtenidas con el programa PC-1D-5 para los sensores de la difusión 343: sensor 01 (a), sensor 02 (b) y sensor 06 (c).

4. CONCLUSIONES

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 $n^{++}p^{+}$ 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 juntura.

Para caracterizar eléctricamente los dispositivos fabricados, se utilizó un simulador solar clase C según Norma Argentina IRAM 210013-2 con irradiancia equivalente a 1 kW/m² y espectro AM1.5, para la medición de la curva corriente-tensión. Con estas curvas se obtuvo la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}) y el factor de forma (FF) de los dispositivos fabricados.

Para la caracterización electrónica se trabajó con un equipo desarrollado en el DES para la medición de la respuesta espectral bajo Norma Argentina IRAM 210013-12. Se obtuvieron mediciones de RE de varios sensores de las difusiones 341, 343, y 344 y se calcularon las corrientes de cortocircuito de los sensores estudiados a través de estas curvas, pudiendo comparar estos valores con los obtenidos mediante las curvas I-V. Se concluyó que tanto la caracterización eléctrica como electrónica 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 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.

Se realizaron simulaciones de la respuesta espectral de los sensores con difusiones 341 y 343, y se obtuvo una profundidad de juntura menor en aquellos sensores de la difusión modificada que presentaban mayor RE en bajas longitudes de onda, sin embargo se prevé medir este parámetro para corroborar los resultados obtenidos. 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.

2. REFERENCIAS

- Bolzi C. G., Martínez Bogado M. G., Tamasi M. J. L., y Plá J. C. (2002). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **6**, 11.01-11.02.
- 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**, 29-36.
- 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 eritemática en la ciudad de Salta. *Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, **1**, 11.79-11.84, Argentina.
- Green M. A. (1986). *Solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. University of New South Wales, Australia.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2016). *Norma Argentina IRAM 210013-2: Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *Norma argentina IRAM 210013-12: Método normalizado para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas*.
- Luccini E., Cede A., Piacentini R., Villanueva C., y Canziani P. (2006). Ultraviolet climatology over Argentina. *Journal of geophysical research*, **111**, D17312.
- 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**, 09-07.
- Servicio Meteorológico Nacional, consulta 12/02/2016. <http://www.smn.gov.ar/?mod=ozono&id=2>
- Suárez H., Castillo J., Salazar G., Acosta D., Cadena C., Marín M. J., Utrillas P., y Martínez L. J. A. (2014). Medición de riesgo solar en la puna y Salta por dosimetría personal. *Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, **2**, 11.119-11.127.
- Tamasi M. J. (2003). Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización. Universidad Nacional de General San Martín. 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**, 04.25-04.3.