

ESTUDIO DE CELDAS SOLARES DE Ge PARA APLICACIONES TERMOFOTOVOLTAICAS

M. Barrera^{1,2}, F. Rubinelli^{3,2}, M. Alurralde¹, J. Plá^{1,2}

¹ Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes,
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³ INTEC-CONICET, Universidad Nacional del Litoral, Güemes 3450, 3000 Santa Fe
Tel. 011-47271802 – Fax 011-47277121 e-mail: barrera@tandar.cnea.gov.ar

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 03/10/12

RESUMEN: Un sistema termofotovoltaico consta de tres partes distintas: una fuente de calor, la cual puede ser una llama o un emisor selectivo, un filtro de infrarrojo y una celda fotovoltaica. Debido a las características de su *band gap*, el Ge es un material apropiado para su utilización como celda termofotovoltaica en este tipo de sistemas, motivo por el cual fue elegido para su estudio en este trabajo. Se consideraron entonces homojunturas de Ge con ventana pasivante, para lo que primeramente se consideró InGaP y luego GaAs. Se simuló numéricamente el dispositivo con el código D-AMPS-1D, obteniéndose los parámetros eléctricos, la eficiencia cuántica externa y la reflectividad óptica espectral. Como fuente de iluminación se consideró el espectro generado por un emisor con manto incandescente de Er₂O₃ y el espectro AM1.5g con fines comparativos. Finalmente se calcularon los parámetros eléctricos para la homojuntura de Ge con ventana de GaAs a 50°C, temperatura típica de operación de los sistemas termofotovoltaicos.

Palabras clave: celdas, germanio, simulación numérica, aplicaciones termofotovoltaicas

INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 60's diversas misiones espaciales norteamericanas y rusas han utilizado sistemas termovoltáicos para la provisión de energía eléctrica basados en isótopos radiactivos (RTG, del inglés: *Radioactive Thermoelectric Generator*) generalmente emisores alfa, como fuentes de calor. Si bien algunas misiones llevaron reactores al espacio, la gran mayoría se basaron en sistemas RTG, como se puede ver como ejemplo el trabajo de Lange et al (2008). El uso de sistemas RTG es mandatorio en los siguientes casos: misiones que se alejan del Sol más allá de Marte, por ejemplo las misiones *Voyager*, *Cassini*, *Depth Space*, etc.; donde es necesario lograr independencia del Sol durante largos períodos de tiempo, como en algunos experimentos en la Luna de las misiones Apollo y en el vehículo robot enviado a Marte, *Curiosity*, para independizarlo de los efectos de las tormentas de polvo. La NASA ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de sistemas RTG y motores Stirling. Estos últimos aún no han volado, y presentan la desventaja de que al poseer partes móviles se producen vibraciones y ruido eléctrico. Por otra parte han trabajado, en menor medida, en sistemas termofotovoltaicos (TPV) (Wilt et al., 2007).

Los sistemas RTG se basan en el efecto Seebeck, es decir utilizan una diferencia de temperatura para extraer potencia, pero a diferencia de las termocuplas que trabajan a circuito abierto como sensores de temperatura, trabajan a circuito cerrado, lo que produce el efecto Joule que va en detrimento del rendimiento. Los sistemas TPV no poseen este problema debido a que no presentan contacto físico con la fuente de calor.

La motivación de este trabajo es explorar la posibilidad de aprovechar la experiencia del Departamento de Energía Solar de la CNEA para estudiar la factibilidad de desarrollar sistemas de TPV para futuros proyectos energéticos tanto en la Tierra como el espacio.

Un sistema TPV consta de tres partes distintas, una fuente de calor, la cual puede ser una llama o un emisor selectivo, un filtro y una celda. El emisor selectivo irradia fotones en un intervalo angosto de longitudes de onda, los fotones emitidos son absorbidos por la celda termofotovoltaica, la cual debe poseer un *band gap* apropiado de modo tal que su respuesta espectral se superponga con el pico de emisión de la fuente. Entre el emisor y el dispositivo se coloca un filtro a fin de evitar que los fotones que se encuentran por debajo del *gap* calienten la celda (Figura 1).

Las celdas solares de Ge se emplean en la actualidad en dos aplicaciones fundamentales: como parte integrante de multijunturas o para aplicaciones termofotovoltaicas. Se puede citar como ejemplo de la primera situación a las celdas de triple juntura InGaP-GaAs-Ge, donde la celda de Ge se utiliza como celda *bottom* (Sato et al., 2009). En este caso, además de contribuir a la generación de energía del dispositivo, el Ge aporta soporte mecánico ya que se utiliza como sustrato.

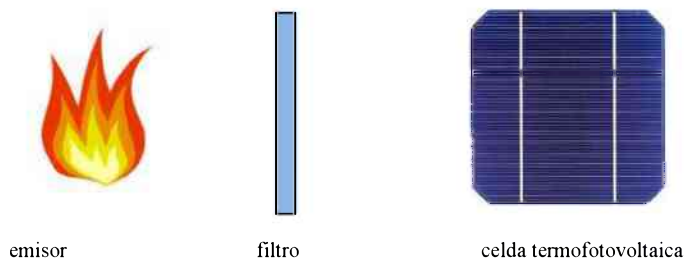


Figura 1: Esquema de un sistema termofotovoltaico (TPV): emisor, filtro de infrarrojo y celda.

La aplicación de homojunturas de Ge en usos termofotovoltaicos es apropiada debido a que el *band gap* del Ge puede absorber la radiación de fuentes de calor de alrededor de 1400 °C, temperatura típica en un arreglo TPV (Galiana et al., 2007). Ejemplo de aplicaciones son los trabajos de Nagashima et al. (2003), Prieto et al. (2009), van der Heide et al. (2009) y Posthuma et al. (2007).

Para la simulación de homojunturas de Ge se utilizó el código D-AMPS-1D (*New Developments - Analysis of Microelectronic and Photonic Devices – One Dimensional*) (Plá et al., 2007a; Rubinelli et al., 2001; Vukadinovik et al., 2007). El código es una versión actualizada del programa AMPS que fue desarrollado inicialmente en *The Pennsylvania State University*, EE.UU. durante los años 1988-1993. En AMPS se utiliza la técnica de diferencias finitas y la iteración de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones de Poisson y de continuidad en una dimensión con condiciones de contorno apropiadas. La letra “D” en D-AMPS se refiere al agregado de subrutinas que constituyen nuevos desarrollos introducidos a AMPS para permitir una mejor caracterización y diseño de celdas de silicio amorfo, cristalino o microcristalino. A modo de ejemplo se pueden mencionar la inclusión de: estados amfotéricos, el modelo de *Pool-Frenkel*, el *Defect Pool Model*, *Tunnelling* directo a energía constante, *Recombination Tunneling*, variación espacial continua de parámetros electrónicos y ópticos (E_g , dopaje, movilidades, secciones eficaces, etc.) *scattering* de la luz en superficies rugosas, interferencia óptica, etc.. En su versión más reciente, se introdujo la posibilidad de simular celdas solares basadas en materiales III-V incluyendo la posibilidad de contar con los mecanismos de recombinación banda-banda (directa) y Auger (Barrera et al., 2007; Plá et al., 2007b; Barrera et al., 2008).

El código permite simular homojunturas, heterojunturas, multijunturas, etc., definiendo una estructura de capas de diferentes materiales mediante la selección de parámetros característicos tales como la energía del *band gap* E_g , la movilidad de los portadores, los coeficientes de absorción y la concentración de dopantes entre otros. Permite evaluar curvas características de dispositivos como la curva corriente-tensión ($J-V$) en condiciones de oscuridad e iluminación, la eficiencia cuántica externa (EQE), la reflectividad, etc., así como magnitudes internas como el campo eléctrico, las concentraciones de portadores libres y atrapados, las corrientes de electrones y de huecos, las tasas de recombinación y de generación, etc. Contempla la posibilidad de incorporar capas definidas sólo por sus características ópticas que pueden añadirse al contacto frontal, como por ejemplo como capas antirreflectantes (AR) y sustratos o contactos en la cara posterior del dispositivo.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE HOJUNTURAS DE Ge

El dispositivo simulado consiste en una homojuntura de Ge n-p con una ventana de un material III-V con características similares a la presentada en Barrera et al. (2010). Para la ventana se consideró en primera instancia el InGaP, para luego completar el estudio con una ventana de GaAs. La estructura de la celda simulada puede verse en la Figura 2 donde se muestran las regiones definidas en D-AMPS-1D para la simulación.

1	n	ventana GaAs / InGaP
2	n	ventana GaAs / InGaP
3	n	emisor Ge
4	n	emisor Ge
5	p	base Ge
6	p	base Ge

Figura 2: Esquema de la celda de Ge estudiada donde se especifican las regiones definidas en el D-AMPS-1D para su simulación.

Las principales características de las regiones se muestran en la Tabla 1. Los parámetros ingresados a D-AMPS-1D fueron extraídos de las referencias presentadas en Barrera et al. (2010).

	<i>ventana 1</i>	<i>ventana 2</i>	<i>emisor</i>	<i>base</i>
Material	InGaP	GaAs	Ge	Ge
E_g (eV)	1.82	1.424	0.664	0.664
espesor (nm)	variable	variable	180	180000
N_D (cm ⁻³)	3×10^{18}	3×10^{18}	8.5×10^{18}	-
N_A (cm ⁻³)	-	-	-	1.5×10^{17}
movilidad de electrones (cm ² /V.s)	803	2050	1000	2600
movilidad de huecos (cm ² /V.s)	40	95	200	700
coeficiente de recombinación directa (cm ³ /s)	1×10^{-10}	6×10^{-10}	-	-
coeficiente de recombinación Auger (cm ⁶ /s)	3×10^{-30}	1×10^{-30}	1×10^{-30}	1×10^{-30}

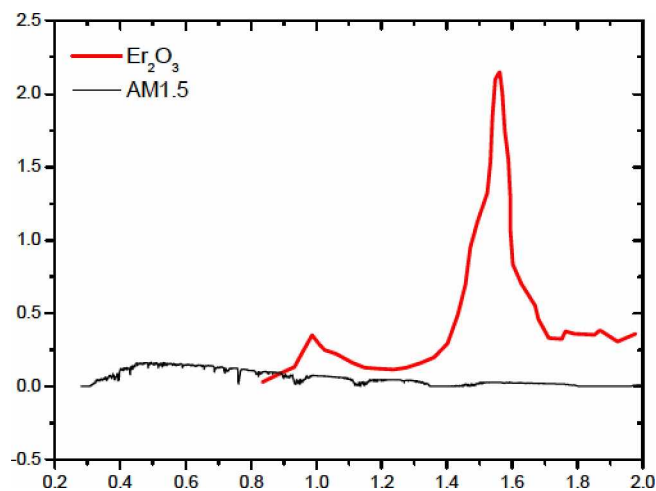
Tabla 1: Principales parámetros utilizados para la simulación (300K).

Otros detalles considerados en la simulación fueron:

- Sin capa antirreflectante (AR)
- $S = 1 \times 10^6$ cm/s (velocidad de recombinación superficial en la cara frontal)
- factor de transparencia= 0.91
- secciones eficaces de defectos y densidad de defectos adaptadas para tener un tiempo de vida media $\tau = 10 \mu s$ en la base.
- contacto posterior: Ag

Cabe aclarar que las simulaciones del dispositivo son preliminares, con la estructura del dispositivo no optimizada desde el punto de vista antirreflectante. Como iluminación se consideró un emisor con manto incandescente de Er₂O₃ de uso típico en TPV (Bitnar et al. 2002), con el espectro presentado en el trabajo de van der Heide et al. (2009). Por otra parte y a fines comparativos, se tuvo en cuenta el espectro AM1.5g (Figura 3). Se puede observar que el espectro del emisor de Er₂O₃ posee una intensidad mucho mayor que la del espectro AM1.5g. Esto se debe a la cercanía entre el emisor y la celda en este tipo de aplicaciones. El corrimiento en longitudes de onda del espectro de emisión del Er₂O₃ respecto del espectro AM1.5 se debe a que en el primer caso la fuente se encuentra a 1680 K, mientras que en el segundo corresponde aproximadamente a la emisión de un cuerpo negro a 6000 K.

Se consideró la presencia de un filtro de infrarrojo a partir de 1.9 μm , por lo que las simulaciones fueron realizadas hasta esa longitud de onda.



La distancia típica entre el emisor de radiación y la celda es del orden de los centímetros (van der Heide et al., 2009; Babladi, 1999). Por otro lado, la geometría de intercambio entre el emisor y la celda es plana.

Primeramente se varió el espesor de la ventana de InGaP de modo de obtener los parámetros eléctricos óptimos. El mismo trabajo se hizo seguidamente para la ventana de GaAs. Se consideraron los espectros AM1.5g y el emitido por la fuente de Er_2O_3 , los resultados se muestran en la Tabla 2 y en las Figuras 4 y 5, donde se muestran también los resultados para el caso sin ventana. Se puede apreciar que hay una variación importante para los espesores óptimos de la ventana según el espectro considerado. Por otra parte, en el caso del sistema TPV la eficiencia aumenta casi al doble con respecto a las características con el espectro AM1.5g.

material	espectro	d(ventana) (nm)	V_{ca} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	(%)
GaAs	AM1.5	40	0.219	34.4	5.7
GaAs	Er_2O_3	100	0.278	248.5	10.2
InGaP	AM1.5	40	0.221	36.7	6.2
InGaP	Er_2O_3	110	0.280	263.2	10.8
sin ventana	AM1.5g	0	0.209	23.7	3.3
sin ventana	Er_2O_3	0	0.269	193.3	7.6

Tabla 2: Parámetros eléctricos obtenidos para los casos con ventana de GaAs e InGaP, con espectros AM1.5 (potencia incidente 1 kW/m^2) y el espectro del emisor de Er_2O_3 (potencia incidente 4.8 kW/m^2) (300K).

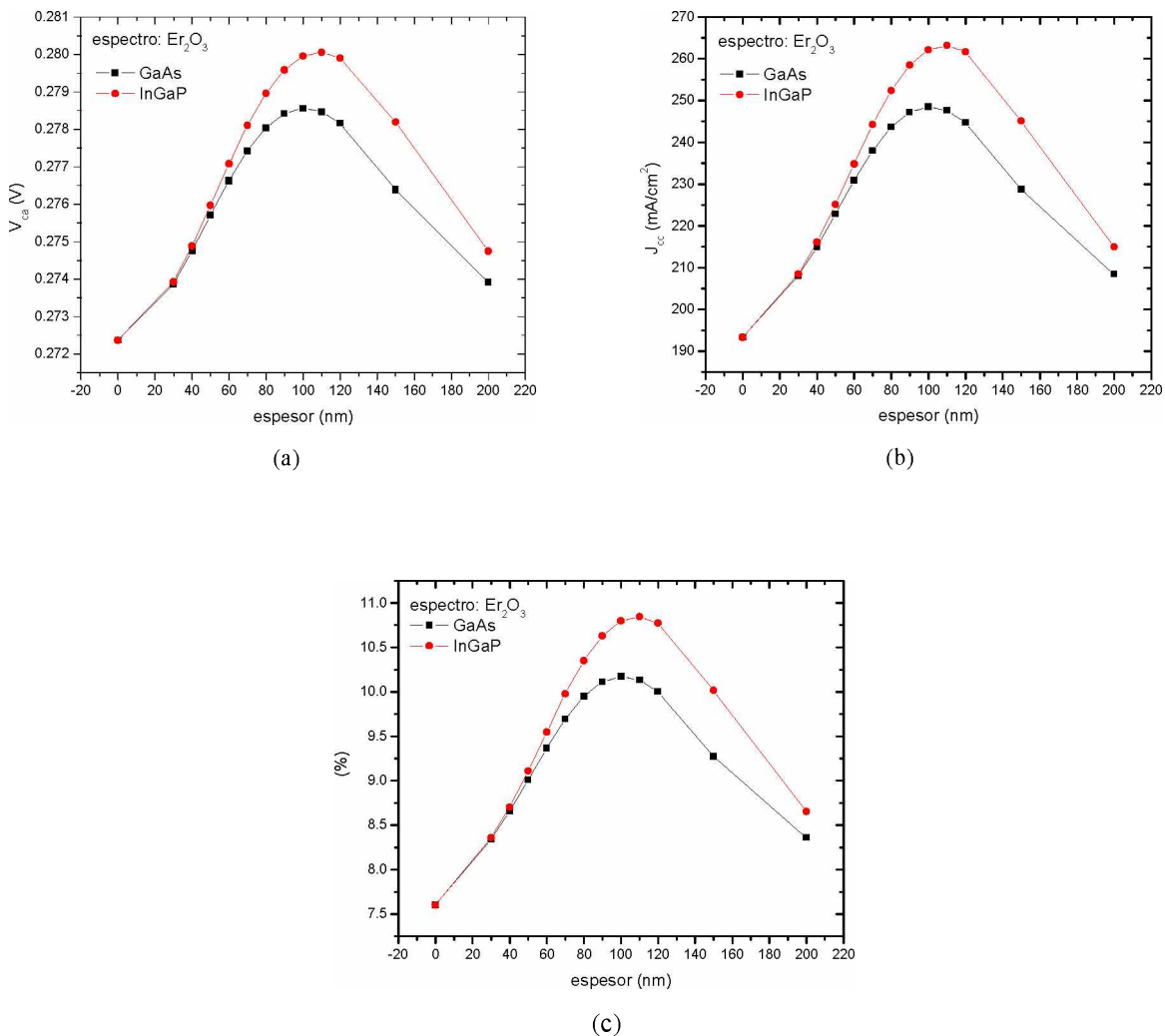


Figura 4: Parámetros eléctricos. (a) tensión de circuito abierto, (b) corriente de cortocircuito y (c) eficiencia para la celda de Ge con ventanas de GaAs o InGaP. Espectro incidente del emisor de Er_2O_3 con una potencia de 4.8 kW/m^2 .

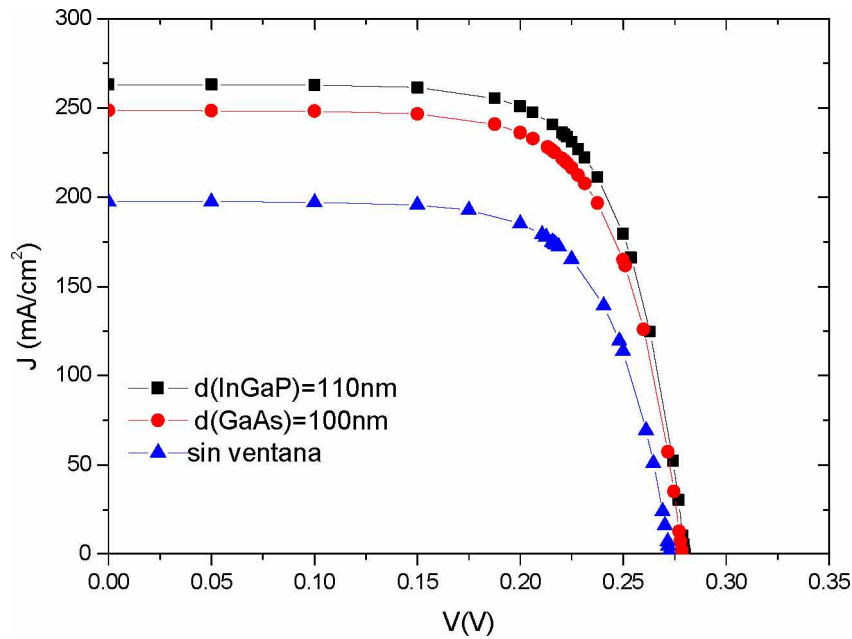


Figura 5: Curvas J - V para las ventanas de InGaP, de GaAs con espesores óptimos y el caso sin ventana, con iluminación del emisor de Er_2O_3 normalizada a 4.8 kW/m^2 .

A fin de evaluar la influencia de la capa ventana en las características ópticas de la celda, se calculó la reflectividad para los espesores óptimos presentados en la Tabla 2. Se observa que el caso más desfavorable corresponde al caso sin ventana, ya que en ese caso el dispositivo es más reflectante (Figura 6) y, por otra parte, se pierde la función de pasivación de la superficie frontal del dispositivo que cumple dicha capa debido a su alto *band gap* con respecto al Ge. Una situación similar fue estudiada para el caso de una celda de GaAs con ventana de InGaP presentada en el trabajo de Plá et al. (2007a).

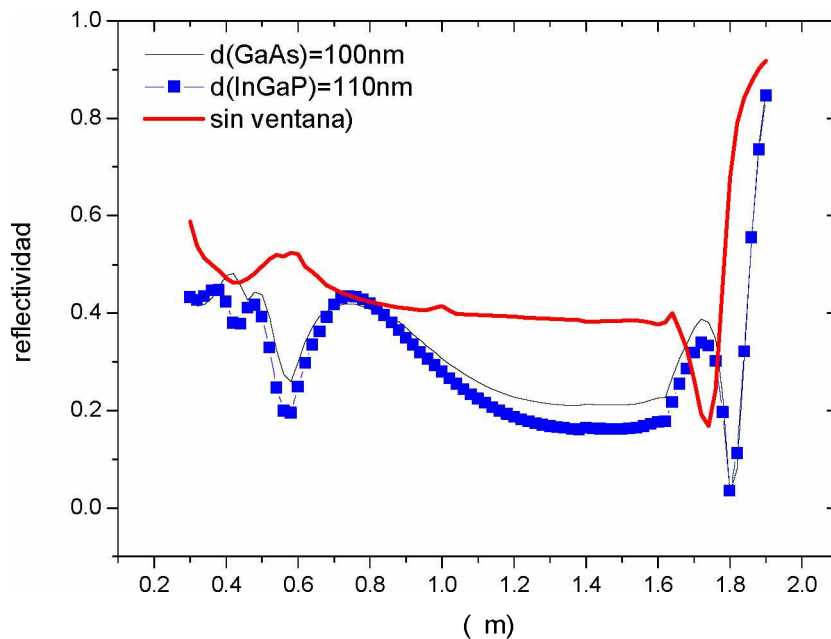
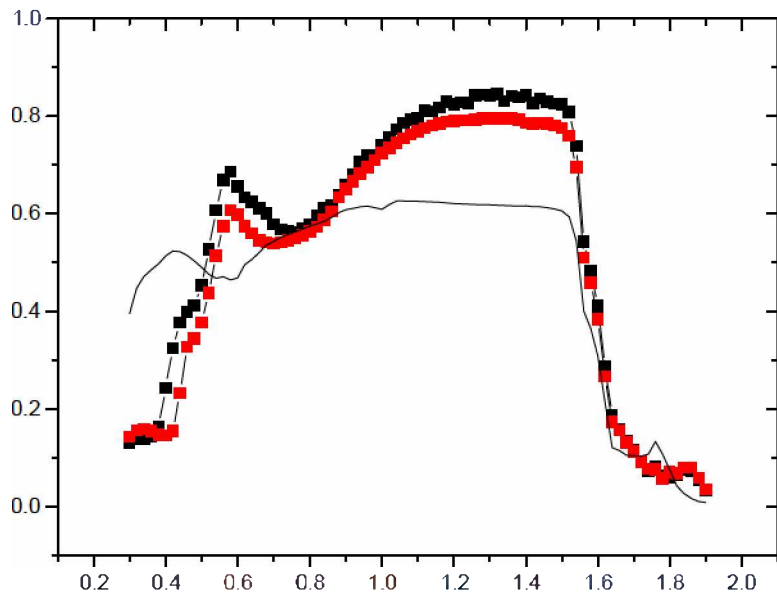


Figura 6: Reflectividad óptica espectral para los casos sin ventana, con ventana de InGaP y con ventana de GaAs.

También se puede observar que, para los casos de los espesores óptimos para las ventanas de InGaP y GaAs encontrados, las curvas de reflectividad muestran un mínimo alrededor de $0.55 \mu\text{m}$, y un segundo mínimo cerca de $1.5 \mu\text{m}$ donde se encuentra el pico de emisión de la fuente. Este hecho se debe a la interferencia óptica producida por la capa delgada que constituye la ventana. El efecto sobre la reflectividad se correlaciona en forma inversa en la eficiencia cuántica externa (EQE), mostrada en la Figura 7.



A continuación se presentan los resultados de Anderson et al. (2007) para cada tipo de generador de potencia, cabe remarcar que existe una gran diferencia en las condiciones de trabajo que se presentan para cada caso.

	<i>RTPV Radioisotope Thermo- photovoltaic</i>	<i>MMRTG (SiGe) Multi.Mision Radioisotope Thermoelectric Generator</i>	<i>Ad. RTG Radioisotope Thermoelectric Generator</i>	<i>ASCD Advance Stirling Convertor Development</i>	<i>TPV (prop.) Thermo- photovoltaic</i>
T (K)	1050	707	500	620	1380
Eficiencia (%)	>15	6.3	>10	36	10
Pot. específica (W/Kg)	>15	2.8	5	>8	>10*
Comentarios	celda de InGaAs	gran herencia		vibraciones, ruido eléctrico	celda de Ge
Referencias	Anderson et al. (2005)	Wilt et al. (2007)	Caillat et al. (2001), Anderson et al. (2005)	Anderson et al. (2005)	este trabajo

*Debido a que el peso va a estar controlado por la fuente radioactiva se puede asumir que la potencia específica va a ser similar a la de RTPV, corregido por la diferencia de eficiencia.

Tabla 4: Comparación de las prestaciones de diversos sistemas de potencia de uso espacial con el propuesto en este trabajo.

Para este trabajo, la eficiencia de la columna TPV (prop.) fue calculada dividiendo la potencia máxima por la potencia incidente, calculada como el área del espectro del emisor de Er_2O_3 de la Figura 3.

CONCLUSIONES

Se simuló numéricamente una celda de Ge con el objetivo de evaluar su comportamiento para aplicaciones termofotovoltaicas. Para este dispositivo se estudiaron ventanas de InGaP y de GaAs, y como fuente de iluminación se consideró el espectro emitido por un emisor con manto incandescente de Er_2O_3 . Tras el análisis se concluyó que los resultados obtenidos en el caso de iluminar con Er_2O_3 son esencialmente distintos al caso de iluminar con el espectro utilizado para aplicaciones terrestres. Estos resultados permitirán diseñar en el futuro dispositivos para una aplicación real como fuente de potencia en misiones espaciales.

Asimismo, se consideraron dos alternativas para la pasivación de la cara frontal del dispositivo, encontrándose valores óptimos para sus espesores, óptimos que se relacionaron con su función como antirreflectante en la estructura del dispositivo considerada.

REFERENCIAS

- Anderson D.J., Wong W.A., Tuttle K.L. (2005). An Overview and Status of NASA's Radioisotope Power Conversion Technology NRA, Publicación NASA/TM—2005-213980, 1-8.
- Babladi M.R. (1999). Radiative properties of IR materials, Tesis de Maestría. New Jersey Institute of Technology.
- Barrera M., Plá J., Rubinelli F. (2007). Simulación numérica de celdas solares de GaAs. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **11**, 04.93 – 04.99.
- Barrera M., García J., Socolovsky H., Rubinelli F., Godfrin E., Plá J. (2008). Activities on simulation and characterization of multijunction solar cells for space applications in Argentina. *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 781-784.
- Barrera M., Rey-Stolle I., Rubinelli F., Plá J. (2010). Simulación numérica de celdas solares de Ge. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **14**, 04.63 – 04.69.
- Bitnar B., Durisch W., Mayor J.-C., Sigg H., Tschudi H. (2002). Characterisation of rare earth selective emitters for thermophotovoltaic applications **73**, 221-234.
- Caillat T., Fleurial P., Snyder G.J., Borschevsky A. (2001). Development of High Efficiency Segmented Thermoelectric Unicouples. *Proceedings of XX International Conference on Thermoelectrics*, 282-285.
- Emcore: http://emcore.com/space_photovoltaics.
- Emery K. (2003). Characterizing thermophotovoltaic cells. *Semiconductor Science Technology* **18**, S228-S231.
- Fraas L.M., Avery J.E., Huang H.X., Martinelli R.U. (2003). Thermophotovoltaic system configurations and spectral control. *Semiconductor Science Technology* **18**, S165-S173.
- Galiana B. Rey-Stolle I., García I., Datas A., Algora C. (2007). MOVPE growth on Ge Substrates for thermophotovoltaic cell applications. *Proceedings of the EW-MOVPE XII*, D6.
- Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. (ed.) (2000). *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, pp. 77-103, Vol.1. World Scientific Publishing Company, Singapur.
- Mahorter R.G., Wrnsman B., Thomas R.M., Siergiej R.R. (2003). Thermophotovoltaic system testing **18**, S232-S238.
- Nagashima T., Okumura K., Muratal K., M. Yamaguchi M. (2003). A germanium back-contact type cell for thermophotovoltaic applications. *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 200-203.
- Plá J., Barrera M., Rubinelli F., García J., Socolovsky H., Bosi M., G. Attolini, C. Pelosi (2007a). Avances en el estudio de celdas solares basadas en materiales III-V. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **11**, 04.85-04.92.

- Plá J., Barrera M., Rubinelli F. (2007b). The influence of the InGaP window layer on the optical and electrical performance of GaAs solar cells. *Semiconductor Science and Technology* **22**, 1122-1130.
- Posthuma N.E., van der Heide J., Flamand G., Poortmans J. (2007). Emitter Formation and Contact Realization by Diffusion. *Applied Physics Letters* **91**, 191102-1 - 191102-3.
- Prieto I., Galiana B., Postigo P. A., Algora C., Martínez L.J., Rey-Stolle I. (2009). Enhanced quantum efficiency of Ge solar cells by a two-dimensional photonic crystal nanostructured surface. *Applied Physics Letters* **94**, 191102-1 - 191102-3.
- Rubinelli F.A., Rath J.K., Schropp R.E.I. (2001). Microcrystalline n-i-p tunnel junction in a-Si:H/a-SiH tandem cells. *Journal of Applied Physics* **89**, 4010-4018.
- Sato S., Miyamoto H., Imaizumi M., Shimazaki K., Morioka C., Kawano K., Ohshima T. (2009). Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated with various-energy protons. *Solar Energy Materials & Solar Cells* **93**, 768-773.
- Spectrolab: <http://www.spectrolab.com/DataSheets/cells/PV%20XTJ%20Cell%205-20-10.pdf>.
- van der Heide J., Posthuma N.E., Flamand G., Geens W., Poortmans J. (2009). Cost-efficient thermophotovoltaic cells based on germanium substrates. *Solar Energy Materials & Solar Cells* **93**, 1810-1816.
- Vukadinovic M., Smole F., Topic M., Schropp R.E.I., Rubinelli F.A. (2004). Transport in tunnelling recombination junctions, a combined computer simulation study. *Journal of Applied Physics* **96**, 7289 (2004).
- Wilt D., Chubb D., Wolford D., Magari P., Crowley C. (2007). Thermophotovoltaics for Space Power Applications. *Proceedings of 7th Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, 335-345.

ABSTRACT

A thermal-photovoltaic system contains three different components: a source of heat that could be a black body or a selective emitter, and infrared filter and a solar cell. The low band gap of Ge makes this material suitable for thermal-photovoltaic applications. In this contribution Ge based homo-junction solar cells with passivating windows of InGaP and GaAs were analyzed. The different structures were modeled with the computer code D-AMPS-1D to obtain the external quantum efficiency, the optical reflectivity adopting as inputs electrical parameters collected from the available literature. The light source corresponds to the ones generated by an emitter covered with a layer of incandescent Er₂O₃. The response to the AM1.5g spectrum was also studied for comparison purposes. Finally the electrical parameters that correspond to a Ge homo-junction with a GaAs window operating at 50°C, the typical working temperature of thermal-photovoltaic systems, were evaluated.

Keywords: cells, germanium, numerical simulation, thermophotovoltaic applications