

Filtros de conversión descendente de longitud de onda basados en Sulfuro de Cadmio para reducir la temperatura y mejorar la eficiencia de conversión de celdas solares de Silicio

M.C. Leonel Vargas Moreno ^a, Dr. Carlos Villa Angulo ^b, Dr. Rafael Villa-Angulo ^c, Dr. Iván O. Hernández Fuente ^d, Dr. Ricardo Morales Carbajal ^e, Dr. Víctor M. Juárez Luna ^f.

^{a, b, c, d, e} Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, CP. 21280, Mexicali B.C. leonel.vargas.moreno@uabc.edu.mx, villac@uabc.edu.mx, rafael.villa@uabc.edu.mx, olaf@uabc.edu.mx, ricardo.morales@uabc.edu.mx.

^fFacultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada B.C. juarezv@uabc.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación práctica de filtros fotoluminiscentes (FL) de conversión descendente de longitud de onda basados en Sulfuro de Cadmio (CdS) para reducir la temperatura y mejorar la eficiencia de conversión de celdas solares de silicio. El diseño teórico de los filtros está basado en la estimación de los perfiles de absorbancia y fotoluminiscencia, el espectro incidente, la temperatura promedio retirada por el filtro y la caracterización del desempeño de la celda solar mediante el cálculo del voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}), la curva de densidad de corriente (JV), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (η_{power}) utilizando las ecuaciones básicas para dispositivos con unión PN.

En este trabajo se implementaron dos filtros de conversión descendente de longitud de onda depositando películas delgadas de CdS sobre sustratos de vidrio soda-limo recubiertos con ITO. Para el primero se utilizó la técnica de deposición con rocío en frío utilizando un aerógrafo con aspersión por chorro de aire presurizado, y para la segunda se utilizó la electrodeposición donde se emplearon tres electrodos, uno de trabajo, un contraelectrodo y uno de referencia. Los cálculos teóricos muestran una reducción en la temperatura de operación y las mediciones prácticas un incremento en las características de desempeño de las celdas solares de Si debido a la implementación de filtros.

Palabras clave— Filtros fotoluminiscentes, Sulfuro de Cadmio (CdS), Celda solar, Eficiencia de conversión,

Abstract

This work presents the practical implementation of wavelength down-conversion photoluminescent (FF) filters based on Cadmium Sulfide (CdS). The FF are implemented to improve the conversion efficiency of silicon solar cells. The theoretical design of the FF is based on the calculation of the absorbance and photoluminescence profiles, the incident spectrum, the average temperature removed by the filter and the performance characterization of the solar cell by calculating the open circuit voltage (V_{oc}), the short circuit current density (J_{sc}), the current density curve (JV), the fill factor (FF) and the conversion efficiency (η_{power}) using the basic equations for PN junction devices.

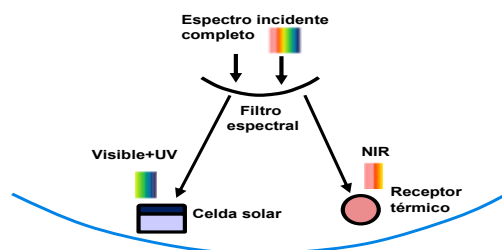
Two wavelength down-conversion filters were implemented by depositing CdS thin films on ITO coated soda-lime glass. For the first filter, a micro airbrush gun with pressurized air jet spraying was used to implement spray-pyrolysis deposition technique, and for the second filter, two working electrodes and one reference electrode were used to implement electrodeposition technique. Theoretical calculations show a reduction in operation temperature and practical measurements show an increase in performance characteristics of the Si based solar cells due to filters implementation.

Keywords— Photoluminescent filters, Cadmium Sulfide (CdS), Solar cell, Conversion efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Los aumentos en la temperatura de operación de las celdas solares reducen la eficiencia de conversión eléctrica, la potencia de salida [1 - 3] y la expectativa de vida [4, 5]. Para minimizar los efectos negativos en las celdas solares provocados por el incremento en la temperatura de operación se han propuesto diferentes métodos y tecnologías a lo largo de los años. Los dos métodos más utilizados son la recuperación de calor residual (WHR) y la división espectral de la luz incidente (SBS). En un sistema WHR, la celda solar es montada encima de un enfriador térmico, que puede ser un tubo por el cual circula un fluido frío. El enfriador térmico absorbe el calor generado por la celda solar trabajando como un sistema de enfriamiento [6]. En un sistema SBS, se utiliza un filtro espectral para separar el espectro de radiación solar entrante. Las longitudes de onda de la luz incidente con menor carga térmica son dirigidas a la celda solar para la producción de electricidad, y las longitudes de onda con mayor carga térmica, por ejemplo, el espectro infrarrojo cercano (NIR), se desvían de la celda sola, como se muestra en la figura (1) [7]. Según Imenes y Mills [8], las tecnologías SBS se pueden clasificar en base a la técnica de división del espectro, por ejemplo, filtrado absorbente-refractivo, filtrado transmisivo-reflexivo, filtrado holográfico y filtrado luminiscente.

Figura (1). Esquema de un sistema de división espectral de la luz incidente (SBS).

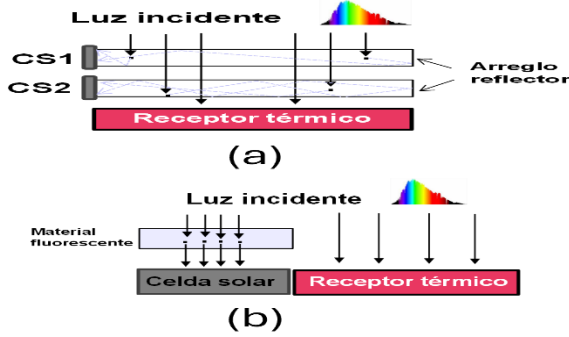


Fuente: Referencia [20]

En el caso del filtrado fotoluminiscente, se coloca un material fluorescente dentro de una placa concentradora transparente plana para absorber la luz solar dentro de un rango de frecuencia f_1 y retransmitirla dentro de un rango de frecuencia f_2 . Para la implementación de este esquema, se han explorado dos métodos. En el primer método, la luz de

fluorescencia queda atrapada dentro de un concentrador debido a la reflexión interna total y es guiada hacia los bordes de la placa, donde puede convertirse en calor o electricidades mediante absorbentes térmicos o celdas solares, como se muestra en la figura (2a) [9]. En el segundo método, la luz de fotoluminiscencia del material fluorescente se desvía hacia las celdas solares para la generación de energía eléctrica, como se muestra en la figura (2b) [10]. Sin embargo, los efectos en las celdas solares debidos a la mitigación de los incrementos de temperatura aun no se han reportado de manera sistemática y exhaustiva. Por lo tanto, cualquier estudio que se centre en los efectos positivos o negativos de la mitigación de los incrementos de temperatura en las celdas solares es beneficioso para la comunidad dedicada a este giro.

Figura (2). Esquema de un sistema de filtrado fotoluminiscente, (a) la luz es guiada hacia las CS, (b) la luz es desviada hacia las CS.



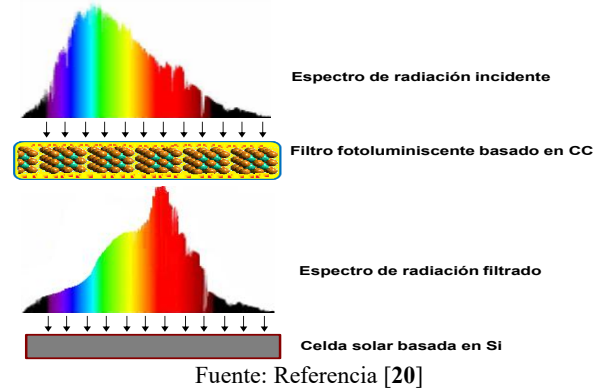
Fuente: Referencia [20]

Por otro lado, en la última década, la comunidad científica dedicada al desarrollo de celdas solares ha centrado su atención en el desarrollo de aplicaciones de semiconductores basados en calcogenuros de cadmio. Esta atención se debe a las propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, químicas y físicas que son únicas en estos materiales. Por ejemplo, el coeficiente de extinción y las longitudes de onda efectivas de absorción y emisión de fotones se pueden ajustar desde longitudes de onda del rango visibles hasta el NIR controlando su tamaño, forma y composición de las partículas [11 - 14]. Además, el CdS es un semiconductor binario de los grupos II-VI con una banda prohibida (E_g) de 2.42 eV [15]. El CdS se está estudiando en varios campos y aplicaciones, tales como emisión laser, fotoluminiscencia (FL), fotocatalisis y celdas solares [16, 17]. Aunque el CdS se ha utilizado en varias aplicaciones prácticas, pocas referencias presentan su potencial en el filtrado espectral para sistemas SBS. Por lo tanto, en este trabajo, para reducir el efecto del incremento térmico en celdas solares basadas en silicio causado por el espectro de luz incidente e incrementar la eficiencia de conversión de las celdas, se implementaron filtros fotoluminiscentes basados en CdS que absorban la energía de longitudes de onda que la celda absorba débilmente y que a su vez aumentan la temperatura de la celda y la retransmitan en longitudes de onda que si sean absorbidas fuertemente por la celda.

El CdS se deposita en el vidrio soda-limo frontal de celdas de silicio para obtener filtros fotoluminiscentes. La figura (3) muestra el sistema solar FL-Celda solar propuesto. El filtro

FF basado en CdS absorberá parte del espectro de luz solar incidente (parte del UV y parte del rango visible) evitando que este espectro incida en la celda solar y lo retransmitirá en el rango visible aumentando la absorción de fotones de la celda. La funcionalidad mencionada anteriormente del FL reduce la radiación UV que es más energética pero menos absorbida por las celdas solares y la retransmite en el rango visible que es menos energética, pero más fácilmente absorbida por las celdas solares basadas en silicio.

Figura (3). Sistema solar FL-Celda Solar propuesto.



Fuente: Referencia [20]

2. DISEÑO Y ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS FILTROS

El perfil teórico de absorbencia del CdS se obtiene con la ecuación (1), donde $k_j(\lambda)$ es el coeficiente de extinción del material que depende de la longitud de onda λ , n es el índice de refracción del material el cual es dependiente de λ y el perfil teórico de emisión se obtiene con la relación de van Roosbroeck Shockley mostrada en la ecuación (2) [18]., donde $\hbar\omega = E_c - E_v$ es la energía de transición entre bandas donde E_c y E_v son la frontera de la banda de conducción y de la banda de valencia respectivamente, \hbar es la constante de Planck testada, c es la velocidad de la luz, $\alpha(\hbar\omega)$ es el coeficiente de absorción y k_j el coeficiente de extinción del material. Los parámetros f_c y f_v se estiman utilizando las ecuaciones (3) y (4) respectivamente. E_f^c el nivel cuasi Fermi en la banda de conducción, E_f^v el nivel cuasi Fermi en la banda de valencia, K_B la constante de Boltzman y T la temperatura en K .

$$\alpha(\lambda) = 4\pi * \frac{k_j(\lambda)}{\lambda} \quad (1)$$

$$\Im(\hbar\omega) = \frac{n^2[\hbar\omega]^2}{\pi^2\hbar^3c^2} \alpha(\hbar\omega) \frac{f_c(1-f_v)}{f_v-f_c} \quad (2)$$

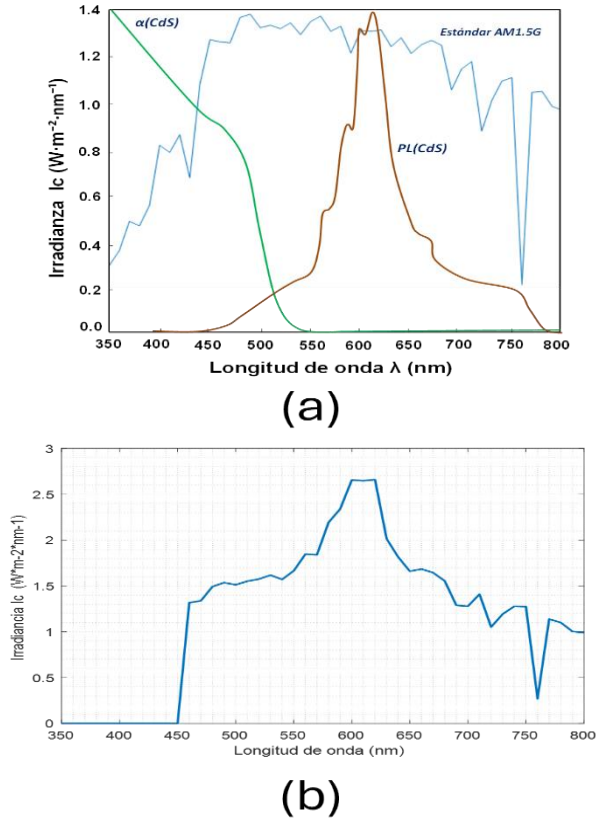
$$f_c = \left[e^{\frac{E_c - E_f^c}{k_B T}} + 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

$$(1 - f_v) = \left[e^{\frac{E_f^v - E_v}{k_B T}} + 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

La figura (4a) muestra el perfil de absorbancia y fotoluminiscencia del CdS y el estándar AM1.5G de emisión solar. En esta figura se observa la alta absorbancia (α) el CdS en longitudes de onda menores a 500 nm, así como una caída a cero relativamente abrupta entre 500 y 520 nm. En el perfil

de fotoluminiscencia (PL) se observa una distribución gaussiana que inicia de manera débil en los 400 nm y va aumentando hasta alcanzar un máximo alrededor de los 610 nm, posteriormente empieza a disminuir extendiéndose hasta 900 nm. La figura (4b) muestra el espectro de radiación posterior al filtro fotoluminiscente el cual es resultante de la absorción y retransmisión del CdS. Este espectro representa la modificación que el filtro provoco al espectro de radiación solar incidente y es el nuevo espectro que impactara a la celda solar de silicio. Por lo que el filtro absorbe casi en su totalidad la irradiación proveniente en longitudes de onda por debajo de los 450 nm, mientras que a partir de los 460 nm hasta los 780 nm la irradiancia empieza a aumentar y en especial en el rango de 600 a 620 nm alcanza casi el doble de su valor original.

Figura (4). (a) Perfil del absorción y fotoluminiscencia del CdS y el estándar AM1.5G. (b) Espectro de radiación después del filtro.



Fuente: Elaboración propia.

La temperatura promedio retirada en la celda solar de Si por el filtro fotoluminiscente se estima restando la temperatura promedio del espectro de irradiación posterior al filtro a la temperatura absoluta promedio del espectro de irradiación solar incidente (AM1.5G). Tanto la temperatura del espectro incidente como del espectro posterior al filtro se calculan utilizando la ecuación (5) obtenida de la ley de Wien basada en resultados experimentales y deducciones termodinámicas presentadas por Dunning-Davies [19]. Donde $I(\lambda, T) = [2hc^2/\lambda^5] \exp[-hc/\lambda kT]$ es la intensidad de radiación o densidad de potencia irradiada dada en W/m^2 , h es la constante de Planck, k es la constante Boltzman y c es la velocidad de la luz.

$$T = -\frac{hc}{\lambda k \ln \left[\frac{\lambda^5 I(\lambda)}{2hc^2} \right]} \quad (5)$$

Posteriormente se obtuvieron las curvas características J-V de las celdas sin y con filtros y para cada caso se obtuvieron las características de desempeño V_{oc} , J_{sc} , FF y η utilizando las ecuaciones (6), (7), (8) y (9), respectivamente.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left\{ \frac{q G_L (L_p + L_n)}{q \left[\frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right]} \right\} \quad (6)$$

$$J_{sc} = -q G_L (L_p + L_n) \quad (7)$$

$$FF = \frac{V_{maxpot} \times J_{maxpot}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (8)$$

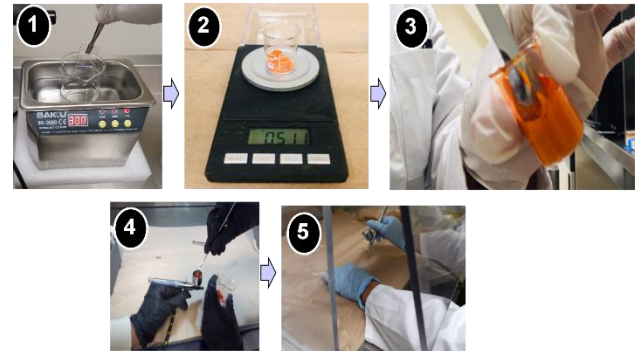
$$\eta = \frac{V_{maxpot} \times J_{maxpot}}{P_{incidente}} \quad (9)$$

3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS FILTROS

Se implementaron dos filtros fotoluminiscentes de conversión descendente de longitud de onda basados en CdS, sobre sustratos de vidrio soda-limo de 50 x 50 mm recubierto con ITO, el primer filtro se implementó utilizando la técnica de rocío en frío o aspersión siguiendo el procedimiento descrito en la figura (5). Se realizó la limpieza química y ultrasónica del sustrato lavándolo con jabón y agua desionizada, posteriormente se sometió a un ciclo de 5 minutos de limpieza ultrasónica en alcohol isopropílico. Se utilizó la técnica de micro-aerógrafo para depositar una solución la cual consistió, en una mezcla homogénea de 1gr de CdS, 0.8 gr de etilenglicol y 0.2 de Etanol.

Previo a la aspersión de la solución, se calentó el sustrato en una placa calefactora durante 30 segundos a una temperatura entre 160°C. Luego, el sustrato de colocó dentro de una campana de extracción para evitar el contacto directo con el vapor presurizado del atomizador, dentro de la campana de extracción. Se realizaron cuatro ciclos de atomización sobre el área deseada del sustrato. Luego, el sustrato se coloca dentro de la caja de Petri y se deja reposar durante 24 horas para que el material depositado se adhiera con mayor fuerza a la superficie del sustrato.

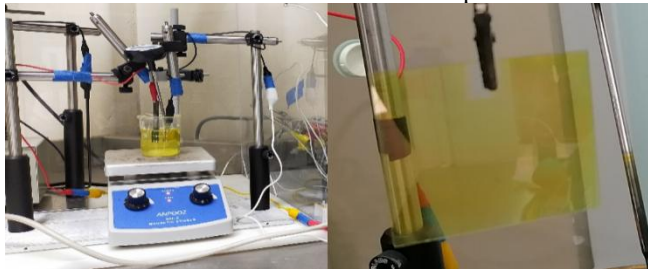
Figura (5). Procedimiento de implementación del filtro fotoluminiscente utilizando rocío en frío.



Fuente: Elaboración propia.

El segundo filtro se implementó utilizando la técnica de electrodeposición. Este filtro se implementó siguiendo el procedimiento descrito en la figura (6). El proceso empieza con la limpieza ultrasónica del sustrato en acetona y alcohol isopropílico, cada uno durante 300 segundos, seguido de un secado a temperatura ambiente durante 300 segundos. La solución electrolítica consistió en disolver 924 mg de Cloruro de Cadmio (CdCl_2) y 460 mg de Azufre (S) en 140 mL de etilenglicol (EG) a 40°C . Se utilizó agitación magnética para lograr una solución homogénea. Posteriormente, se aumentó la temperatura del electrolito a 140°C , se conectaron los electrodos a las terminales de la fuente, la terminal negativa al sustrato de vidrio soda-limo y la positiva a un electrodo de platino, se sumergió el sustrato en el electrolito y se activó la fuente manteniendo la agitación magnética. El proceso de electrodeposición duró 35 minutos, con una densidad de corriente y temperatura constantes de 15 mA/cm^2 y 140°C , respectivamente. Después de completar la electrodeposición de CdS, se llevó a cabo una limpieza ultrasónica adicional en alcohol isopropílico durante 60 segundos a 50 W para eliminar cualquier residuo sobre la película depositada. Este paso post-electrodeposición contribuyó a asegurar la pureza y la calidad final de la película de CdS.

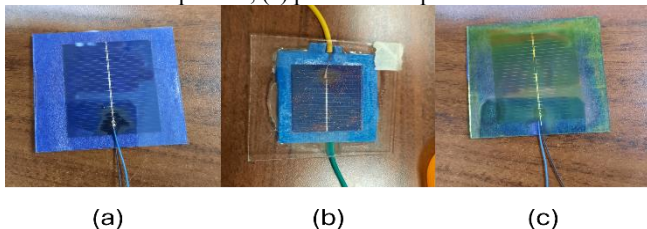
Figura (6). Procedimiento de implementación del filtro fotoluminiscente utilizando electrodeposición



Fuente: Elaboración propia.

La figura (7) muestra los filtros fabricados. Específicamente, la figura (7a) muestra un primer arreglo que consiste en una celda solar de Si adherida a un vidrio soda-limo recubierto con ITO sin depósito de CdS. Este arreglo sirve como referencia para comparar las mediciones realizadas. La figura (7b) y (7c) muestran un segundo y tercer arreglo que consistieron en celdas solares de Si adheridas a vidrio soda-limo recubiertas con ITO con depósito de CdS por aspersión y electrodeposición, respectivamente.

Figura (7). Arreglos de filtros implementados. (a) sin filtro, (b) por aspersión, (c) por electrodeposición.



Fuente: Elaboración propia.

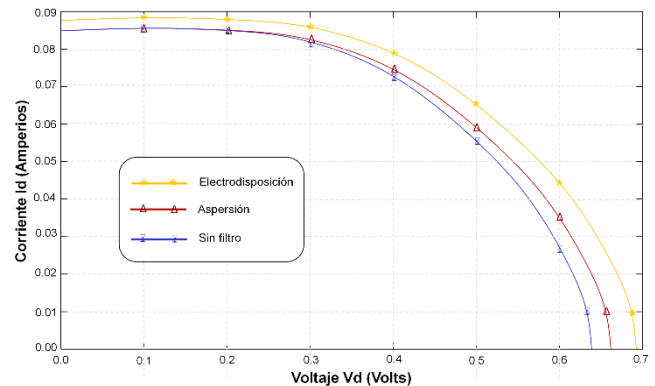
4. RESULTADOS

Para estimar la temperatura absoluta promedio retirada por los filtros de CdS se realizó un cálculo teórico, primero se calculó la temperatura promedio del espectro de irradiación solar

incidente utilizando la ecuación (5) para el rango de longitudes de onda 350 a 800 nm y los valores de intensidad de radiación del estándar Am1.5G, la temperatura obtenida es 471.82°C . Posteriormente se calculó la temperatura absoluta promedio del espectro posterior al filtro de 322.71°C que es el espectro que impacta a la celda solar de Si y se le resta a la encontrada para el espectro incidente.

Para encontrar el efecto de los filtros fotoluminiscentes en las características de desempeño de las celdas solares de Si se realizaron mediciones prácticas. Los arreglos implementados fueron expuestos a una radiación de 1000 W/m^2 obtenida de una lámpara de Xenon colocada en una plataforma reflejante. Posteriormente, las curvas JV fueron obtenidas para cada arreglo.

Figura (8). Curvas IV obtenidas para las celdas sin filtro y con filtros.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura (8) muestra las curvas obtenidas. De esta figura se puede observar que la curva JV del arreglo con filtro implementado por rocío en frío tiene la misma corriente de corto circuito (I_{sc}) que el arreglo sin filtro, pero obtuvo un incremento en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Para el caso de la curva JV del arreglo con filtro por electrodeposición experimentó un incremento en la I_{sc} y V_{oc} con respecto a los otros dos arreglos. Con estos resultados podemos utilizar las ecuaciones (8) y (9) para obtener FF y η respectivamente.

La Tabla (1) muestra los parámetros de desempeño obtenidos de los tres arreglos. En la tabla se puede observar que la eficiencia de conversión más alta se obtuvo con el filtro implementado por electrodeposición con un valor de 13.79.

Tabla (1). Características de desempeño.

Características de desempeño			
Parámetro	Sin filtros	Filtro por aspersión	Filtro por electro deposición
V_{oc} (V)	0.6378	0.6750	0.6900
I_{sc} (mA)	87	86.5	88
V_{max} (V)	0.41	0.43	0.46
I_{max} (mA)	0.72	0.73	0.75
P_{max} (mW)	29.52	31.39	32.12
η_{power} (%)	12.29	12.55	13.79
FF	0.5541	0.5376	0.568
R_{max} (Ω)	569.4	589.0	613.3
T. retirada ($^\circ\text{C}$)	0	149.11	149.11

Fuente: Elaboración propia.

Este valor de eficiencia tiene un incremento de 1.5% con respecto a la celda solar sin filtro y 1.24% con respecto al filtro implementado por rocío en frío. Estos incrementos son consecuencia del incremento en el FF de los arreglos con filtro. El FF incremento en los arreglos con filtro debido a la retransmisión de energía en el espectro de absorción del Si realizada por el CdS. Sin embargo, el mejor desempeño logrado por el filtro implementado por electrodeposición con respecto al de implementado por rocío en frío se puede atribuir a la mayor uniformidad del CdS depositado por electrodeposición, lo que garantiza una retransmisión de energía más uniforme y espacialmente balanceada en la celda solar de Si.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos en la implementación de dos filtros fotoluminiscentes de conversión descendente de longitud de onda basados en Sulfuro de Cadmio (CdS). El primer filtro fue implementado utilizando la técnica de rocío en frío y el segundo utilizando la técnica de electrodeposición. El efecto de la modificación del espectro incidente de ambos filtros fue probado con celdas solares de Si.

De los resultados obtenidos se encontró que el mayor incremento de eficiencia fue de 1.5% debido al efecto en los parámetros de desempeño de la celda solar provocado por el filtro implementado por electrodeposición. Este incremento puede ser atribuido a la retransmisión de la energía absorbida por el filtro del espectro que menos absorbe el Si al espectro que más absorbe. Adicionalmente, teóricamente también puede atribuirse al retiro de 149.11 °C de la celda de Si realizados por el filtro.

Agradecimientos

Los autores le agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico a los estudios de Leonel Vargas Moreno, así como al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por permitirle el uso de las instalaciones y el equipo necesario para la realización de este trabajo.

6. REFERENCIAS

[1] Singh P, Ravindar NM. "Temperature dependent of solar cell performance-and analysis", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 101: 36-45 (2012).
 [2] Skoplaki E, Palyvos JA., "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlation", *Solar Energy*, 83: 614-624 (2009).
 [3] Berthod C, Kristensen ST, Strandberg R, Odden JO, Nie S et al., "Temperature sensitivity of multicrystalline silicon solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaic*, 9 (4): 957-964 (2009).
 [4] Ingersoll JG., "Simplified calculation of solar cell temperatures in terrestrial photovoltaic arrays", *Journal Solar Energy Engineering*, 108: 95-101 (1986).

[5] Eberle R, Haag ST, Geisemeyer I, Padilla M, Schubert MC., "Temperature Coefficient Imaging for Silicon Solar Cells", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8 (4): 930-936 (2018).
 [6] Xing J, Chao X, Zhirong L, Xiaozhe D, Gaosheng W et al., "A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar system with waste heat recovery (WHR)", *Science Bulletin*, 62 (20): 1388-1426 (2017).
 [7] Mojiri A, Taylor R, Thomsen E, Rosengarten G., "Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy—a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28: 654-63 (2013).
 [8] Imenes AG, Mills DR., "Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84, 19-69 (2004).
 [9] Gotzberger A, Greubel W., "Apparatus for convert light energy into elect energy, US Patent 4,110,123, 1978.
 [10] Zhang L, Jing D, Zhao L, Wei J, Guo L., "Concentrating PV/T hybrid system for simultaneous electricity and usable heat generation: a review", *International Journal of Photoenergy*, Special Issue ID 869753 (2012).
 [11] Prasad PN. Introduction to Nanomedicine and Nanobioengineering. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Press, 2012.
 [12] Prasad PN. In: Introduction to Biophotonics: Nanotechnology for Biophotonics: Bionanophotonics. 1st ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2004, pp 520-544.
 [13] Ntziachristos V, Bremer C, Weissleder R., "Fluorescence imaging with near-infrared light new technology advances that enable in vivo molecular imaging", *European Radiology*, 13, 195-208 (2003).
 [14] Sharma P, Brown S, Walter G, Swadeshmukul S, Moudgil B., "Nanoparticles for bioimaging", *Advances in Colloid Interface Science*, 123, 471-485 (2006).
 [15] Villa-Angulo C, Guayante-Santacruz FJ, Villa-Angulo R, Hernandez-Fuentes IO, Morales-Carbajal R et al., "Correlation of theory with experimental photon absorption and photon emission of quasitype II CdS/ZnS QDs", *Journal Nanophotonics*, 12 (4): ID 046010 (2018).
 [16] Chen EY, Li Z, Milleville CC, Lennon KR, Zide JMO et al., "CdSe(Te)/CdS/CdSe Rods Versus CdTe/CdS/CdSe Spheres: Morphology-Dependent Carrier Dynamics for Photon Upconversion", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8 (3): 746-751 (2018).
 [17] Smyntyna V, Semenenko B, Skobeleva V, Malushin N., "Photoactivation of Luminescence in CdS Nanocrystal", *Nanotechnology Journal*, 5: 355-359 (2014).
 [18] Bhattacharya R, Pal B, Bansal B., "On conversion of luminescence into absorption and the van Roosbroeck-Shockley relation", *Applied Physics Letters*, 100, ID 222103 (2012).
 [19] Dunning-Davies, J. "A Fresh Look at Wien's Displacement Law". *Foundations of Physics Letters*, 15(4), 349-361 (2002).
 [20] Victor Manuel Juarez Luna, Daniel Saucedo Carvajal et al., "45-nm CdS QDs photoluminescent filter for photovoltaic conversion efficiency recovery", *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 30, 1016- 1032 (2022).