

ESTABILIDAD DE CELDAS SOLARES HÍBRIDAS (ORGÁNICAS-INORGÁNICAS) DE ÚLTIMA GENERACIÓN

STABILITY OF STATE-OF-THE-ART HYBRID (ORGANIC-INORGANIC) SOLAR CELLS



R. Mendoza-Pérez^{1*}, J. Sastre-Hernández², J. Aguilar-Hernández², E. S. Díaz-Segura¹, J. A. Del Oso¹, L. A. Torres-Bautista², C. Ramos-Vilchis³ y G. Santana³.

¹ Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Prolongación San Isidro No.151, San Lorenzo Tezonco, 09790, México

² Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional Edificio No. 9, U.P.A.L.M., San Pedro Zacatenco, 07738, México.

³ Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, 04510, México.

*Autor de correspondencia: rogelio.mendoza@uacm.edu.mx

DOI: 10.59730/rer.v12n59a3

RESUMEN

Las celdas solares orgánicas presentan la desventaja de que su estabilidad en la eficiencia fotovoltaica aún se mide en miles de horas. Mientras que, la estabilidad en la eficiencia fotovoltaica de las celdas solares inorgánicas se mide en 20 o más años, diez veces más. En este trabajo, se presenta la propuesta de combinar un material orgánico con celdas solares inorgánicas; con el propósito de aumentar la eficiencia fotovoltaica de las celdas solares inorgánicas; y mantener estable la eficiencia fotovoltaica de las celdas solares híbridas obtenidas. Las celdas solares híbridas obtenidas, son el resultado de combinar las propiedades de un polímero conductor orgánico conocido como PEDOT:PSS, con una celda solar inorgánica de película delgada de CdTe. La estabilidad en la respuesta fotovoltaica de estas celdas solares híbridas de última generación se ha logrado incorporando una película delgada de Sb_2Te_3 . Durante 3 años se ha medido la respuesta fotovoltaica en condiciones estándares de medición de estas celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS, con el propósito de observar su estabilidad en la eficiencia fotovoltaica. Mientras que, la celda solar híbrida sin Sb_2Te_3 se ha degradado alrededor de un 13% en este tiempo, la celda solar híbrida con Sb_2Te_3 presenta una degradación en la eficiencia fotovoltaica menor al 1%.

Palabras Clave. Celdas solares Híbridas, Sb_2Te_3 , CdTe, PEDOT:PSS, Estabilidad.

INTRODUCCIÓN.

Las celdas solares han evolucionado desde sus inicios en 1839 cuando el científico francés Edmund Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico. En 1883 el inventor neoyorquino Charles Fritts, publicó en American Journal of Science el artículo "A New form of Selenium Photocell". Fritts envió su prototipo al ingeniero alemán Werner von Siemens (fundador de la empresa Siemens), quién lo presentó a la Real Academia de Prusia; mencionando que las celdas solares de Fritts obtenían energía eléctrica de forma directa de la energía de la luz. Después de 70 años, en el año de 1954 los inventores Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin y Calvin S. Fuller de los laboratorios Bell; descubrieron que el silicio (Si) podría ser más eficiente que el Se, e inventaron una celda solar con Si que alcanzaba una eficiencia fotovoltaica del 6% [1].

La investigación y el desarrollo de la energía fotovoltaica tuvo su primer impulso de la industria; durante la "era espacial" en la década de 1960 para aplicaciones satelitales y debido a la expansión de los transistores de Si. En la década de 1980, las celdas solares de primera generación de silicio mono y policristalino (Si-m y Si-p) aumentaron su eficiencia fotovoltaica hasta alcanzar un 20% [2]. Para la década de 1990, nuevos materiales y tecnologías aparecieron, entre ellos los de película delgada de silicio amorfo (Si-a), teluro de cadmio (CdTe) y cobre-indio-selenio (CIS); conocidas también como celdas solares de segunda generación. Una tercera generación de celdas solares hizo su aparición a principios de este siglo; entre ellas podemos mencionar las celdas solares orgánicas, sensibilizadas, tandem, etc. Finalmente se puede considerar una última generación de celdas solares formadas por celdas solares híbridas y de perovskitas [3].

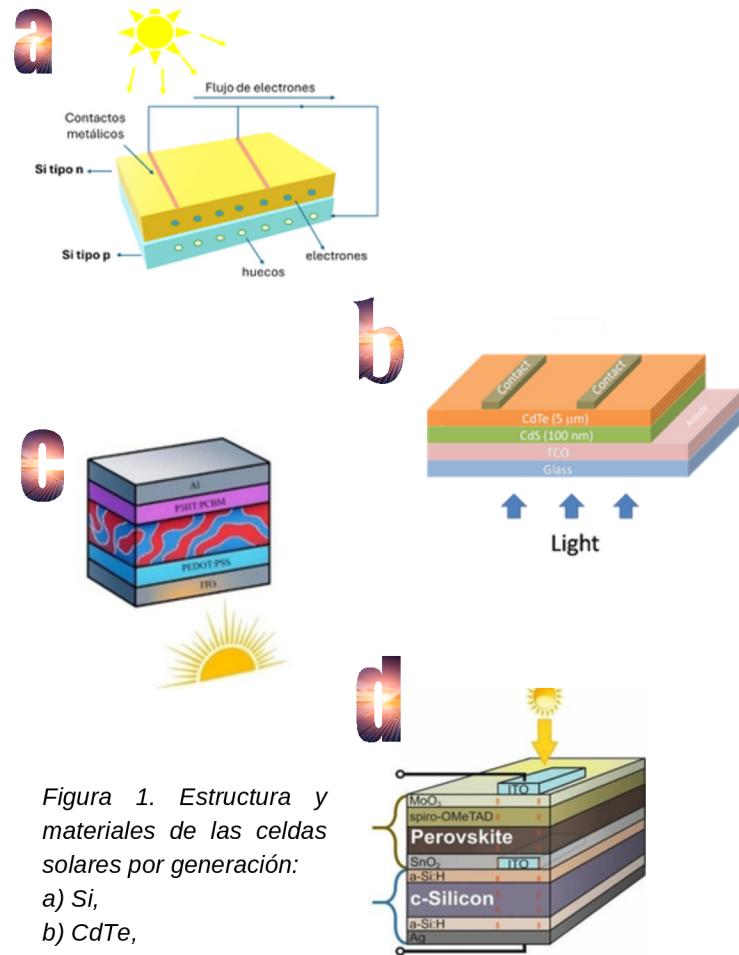


Figura 1. Estructura y materiales de las celdas solares por generación:
a) Si,
b) CdTe,
c) orgánicas y
d) Perovskitas.

En la Figura 1, se puede observar la estructura y materiales que componen algunas de estas celdas solares generacionales. Mientras que en la Figura 2, se puede observar la evolución de la eficiencia fotovoltaica de las celdas solares por tipo de tecnología o generación [4].

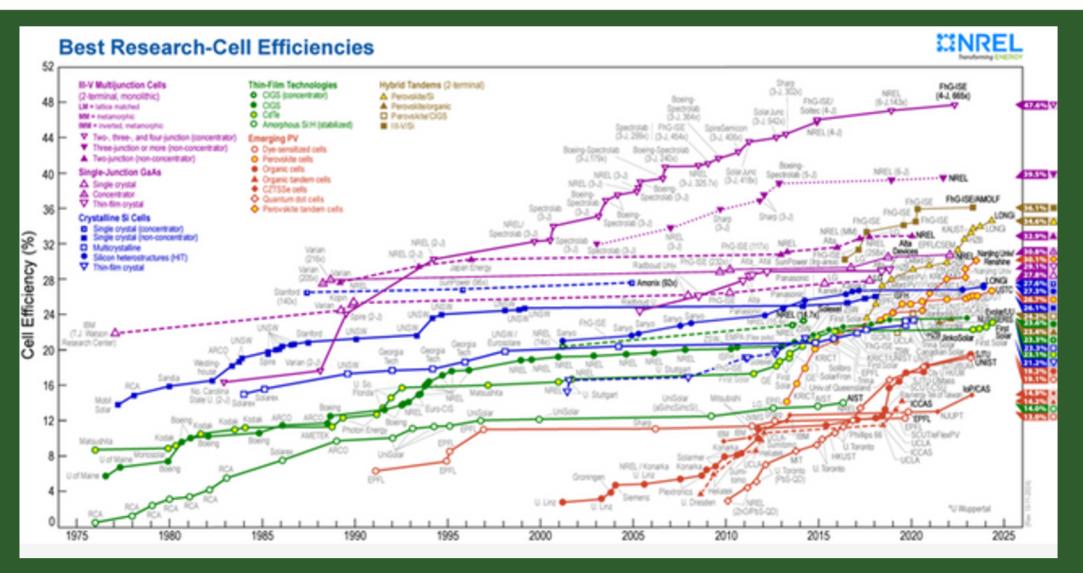


Figura 2. Evolución de la eficiencia fotovoltaica por tipo de tecnología. Fuente NREL

DESARROLLO

Materiales y Métodos.

Una celda solar de película delgada de CdTe está formada por: un vidrio con una película delgada de óxido conductor transparente fluorinado ($\text{SnO}_2:\text{F}$), conocido como TCO (Transparent Conductor Oxide); el cuál es el contacto frontal. Luego se deposita el semiconductor ventana tipo n de sulfuro de cadmio (CdS). La heterounión se forma con un semiconductor absorbente tipo p de teluro de cadmio (CdTe) y por último los metales que componen el contacto posterior son cobre-molibdeno (Cu-Mo). Con el objetivo de incrementar la respuesta fotovoltaica de estas celdas solares inorgánicas; en nuestro Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (LACyTES-UACM), se colocó un polímero conductor orgánico transparente conocido como PEDOT:PSS, entre el CdTe y el Cu-Mo; a estas nuevas celdas se les conoce como celdas solares

híbridas, ver la Figura 3 [5]. El depósito del PEDOT:PSS se realizó mediante la técnica de Spin Coating con un volumen de 200 μL del polímero, a temperatura ambiente, con una velocidad de rotación de 5000 rpm y durante un tiempo de 30s. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes en el uso de materiales orgánicos acuosos en la interface CdTe/PEDOT:PSS, es la difusión de trazas de agua y por tanto de humedad en dicha interface. Lo anterior provoca degradación en estos dispositivos y una menor estabilidad en la eficiencia fotovoltaica de estas celdas solares híbridas [6].

Por otra parte, en las celdas solares inorgánicas de CdTe se ha empleado el uso de materiales semiconductores como teluro de antimonio (Sb_2Te_3) o teluro de zinc (ZnTe) como capas colchón (buffer), para mejorar la unión entre el CdTe y el Cu-Mo [7].



Figura 3. Celda solar híbrida de CdTe/PEDOT:PSS del LACyTES-UACM

La respuesta fotovoltaica de una celda solar se puede determinar mediante la curva de corriente vs. voltaje (I vs. V), que se muestra en la Figura 4. En dicha figura, se muestran los principales parámetros fotovoltaicos de una celda solar: voltaje a circuito abierto (V_{oc}) con unidades de volts, corriente de corto circuito (I_{sc}) con unidades de amperes o densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}) ampere/ cm^2 , factor de forma o factor de llenado (FF) sin unidades y la eficiencia fotovoltaica (η) en unidades de porcentaje.



Figura 4. Curva típica de I vs. V de una celda solar.

El factor de forma (FF) y la eficiencia fotovoltaica (η) se pueden calcular mediante las ecuaciones (1) y (2) y la densidad de corriente con la ecuación (3):

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{J_{mp} V_{mp}}{I_r} \times 100\% \quad (2)$$

$$J_{mp} = \frac{I_{mp}}{A} \quad (3)$$

En donde:

I_r .- Irradiancia [W/m²]

V_{mp} .- Voltaje de máxima potencia [volts]

I_{mp} .- Corriente de máxima potencia [amperes]

A.- Área del contacto de la celda solar [cm²]

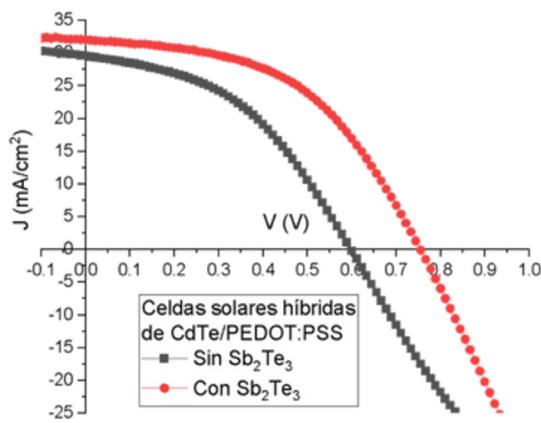
En este trabajo se depositó el Sb₂Te₃ entre el CdTe y el PEDOT:PSS, por la técnica de Sputtering en modo de corriente directa a una temperatura de substrato de 200°C, una potencia de 60 W y una presión de depósito de 5 mTorr, el espesor obtenido del Sb₂Te₃ fue de 75 nm; para mejorar la respuesta fotovoltaica y la estabilidad de estas celdas solares híbridas. Durante más de 36 meses se registró la respuesta fotovoltaica de una celda solar híbrida de CdTe/PEDOT:PSS sin y con Sb₂Te₃.

Resultados y discusión.

La medición de I vs. V se realizó en el LACyTES-UACM, usando un simulador solar Oriel-Newport clase AAA certificado como el que se muestra en la Figura 5, bajo Condiciones de Prueba Estandarizadas (Standard Test Conditions, STC): irradiancia de 1000 W/m², temperatura de la celda solar durante la medición de 25 °C e índice de masa-aire AM1.5.

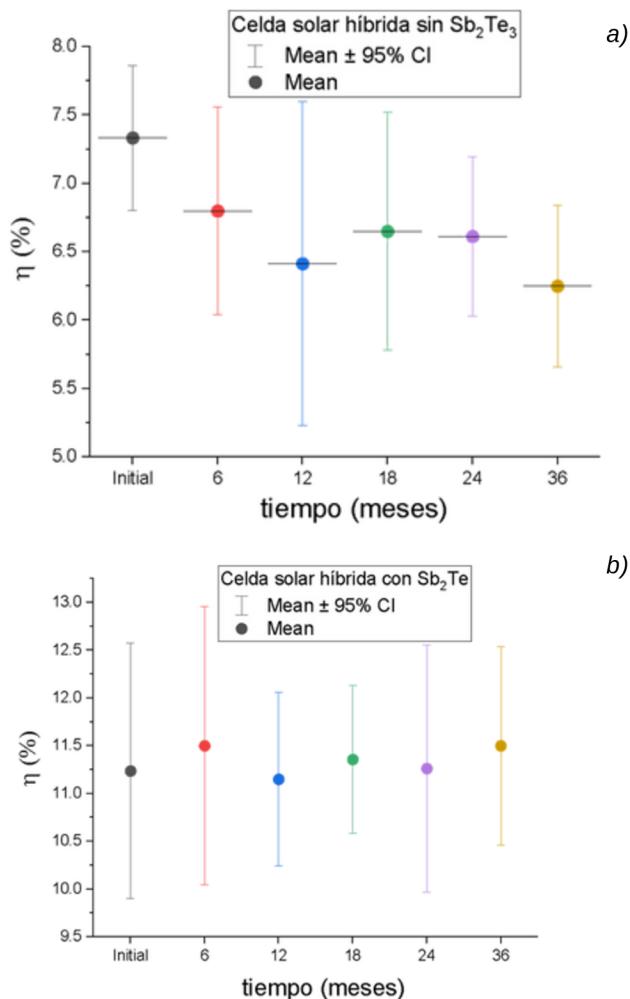


Figura 5. Simulador solar certificado Oriel-Newport AAA del LACyTES-UACM.



Figuras 6. Curva de J vs. V para las celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS, sin y con Sb₂Te₃.

- En la Figura 6, se muestra la curva de J vs. V de las celdas solares híbridas sin y con Sb₂Te₃. Se observa que la celda solar híbrida con Sb₂Te₃ incrementa los parámetros fotovoltaicos del Voc y FF, principalmente; con respecto a la celda solar híbrida sin Sb₂Te₃. La razón de este incremento, se debe principalmente a que el Sb₂Te₃ es un semiconductor con tamaños de grano más pequeños que los del CdTe; los cuales cubren las fronteras de grano del CdTe, mejorando la interface o unión con el PEDOT:PSS y/o el contacto de Cu-Mo [7].



Por otra parte, la Figura 7 muestra los valores de las eficiencias fotovoltaicas promedio y sus respectivas desviaciones estándar para las celdas solares híbridas sin y con Sb_2Te_3 , en un período de 36 meses. Se observa que la celda solar híbrida sin Sb_2Te_3 , disminuye su eficiencia fotovoltaica promedio de 7.3% a valores cercanos a 6.2%. Mientras que, la celda solar híbrida con Sb_2Te_3 mantiene su eficiencia fotovoltaica promedio en 11.3%. Es probable que, el Sb_2Te_3 evite que el polímero PEDOT:PSS se difunda a través de las fronteras de grano del CdTe, provocando la degradación de la celda solar híbrida.

Figura 7. Gráfica de las eficiencias fotovoltaicas registradas en un período de 36 meses para las celdas solares híbridas a) sin Sb_2Te_3 y b) con Sb_2Te_3 .

CONCLUSIONES

Se obtuvieron celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS sin Sb_2Te_3 y con Sb_2Te_3 entre estos 2 materiales. Para las celdas solares con la estructura CdTe/ Sb_2Te_3 /PEDOT:PSS se observa un incremento del V_{oc} de 600 mV a 750 mV, de la J_{sc} de 30.0 mA/cm² a 32.5 mA/cm² y del FF de 0.45 a 0.50; por lo que, la η promedio se incrementó de 7.3% a 11.3%, con respecto a la celda solar sin Sb_2Te_3 . Las celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS con Sb_2Te_3 , presentan una mayor estabilidad en la respuesta fotovoltaica que las celdas solares híbridas sin Sb_2Te_3 ; al haber sido medidas durante 3 años en condiciones estándares de medición (STC). La celda solar híbrida sin Sb_2Te_3 se ha degradado alrededor de un 13%; mientras que, la celda solar híbrida con Sb_2Te_3 presenta una degradación en la eficiencia fotovoltaica menor al 1%. El uso del Sb_2Te_3 con tamaños de grano menores a los tamaños de grano del CdTe, mejora la unión entre el CdTe y el PEDOT:PSS; además de, evitar la difusión del polímero PEDOT:PSS a través de las fronteras de grano del CdTe, lo cuál podría ser la causa de la degradación de la celda solar híbrida CdTe/PEDOT:PSS.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para la realización de este trabajo a los proyectos UACM-CCYT-CON-04, UACM-CCYT-2025-CON-01 de la UACM y a las becas de posgrado SECIHTI.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://www.solarpowerauthority.com/ahistory-of-solar-cells/>
- [2] Historia, Desarrollo y Actualidad de las Celdas solares. Esteban Ojeda Durán. Año 02 Núm. 01. Verano de 2018. Páginas 17–21. FCFM-IFUAP-CIDS
- [3] [Introduction | PV Education](#)
- [4] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>
- [5] Improved photovoltaic parameters of CdTe/PEDOT:PSS solar cells by CSS through their cooling in an O₂ atmosphere". R. Mendoza-Pérez, J. Sastré-Hernández, C. Ramos-Vilchis, José A. Del-Oso, M. del C. Bonilla-Morales and G. Contreras-Puente. *Current Applied Physics* 65(17). May 2024. DOI:[10.1016/j.cap.2024.05.016](https://doi.org/10.1016/j.cap.2024.05.016).
- [6] Torres-Bautista, L.A., Sastré-Hernández, J., Mendoza-Pérez, R. et al. Investigation of the effects of thermal annealing to PEDOT:PSS on the photovoltaic response of hybrid solar cells. *J Mater Sci: Mater Electron* 35, 2020 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13774-z>
- [7] N. Romeo, A. Bosio, R. Tedeschi, A. Romeo, V. Canevari. A Highly Efficient and Stable CdTe/CdS Thin Film Solar Cell, *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells* 58, 1999, pp. 209–218. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00204-9)