

Practical implementation of photovoltaic devices with structure Glass/ITO/CdS/CdSe/Ag using low cost air blast spraying tools

M.I. Monserrat Vargas-Moreno^a, Ph. D. Ricardo Morales-Carbajal^b, Ph. D. Carlos Villa-Angulo^c

^{a,b,c} Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, C.P. 21280, Mexicali, B.C., monserrat.vargas@uabc.edu.mx*, ricardo.morales@uabc.edu.mx, villac@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México.

Resumen

En los últimos años, ha crecido la importancia de buscar mejores y económicas formas en utilizar diferentes tipos de energías renovables. En esta búsqueda, se ha logrado demostrar que la energía solar es una forma de energía de bajo costo en muchos países. En México, por ejemplo, este tipo de energía podría prosperar debido al gran potencial que le otorga el nivel de insolación en la mayoría de su territorio. Aunque la energía solar puede considerarse un tipo de energía de bajo costo, el costo de las celdas solares en ocasiones puede detener el avance de su uso a gran escala. Las películas delgadas de Sulfuro de Cadmio han sido una opción atractiva en la fabricación de paneles solares desde hace ya varios años gracias a su amplia banda prohibida y su capacidad para absorber gran parte del espectro solar. En este trabajo se implementó prácticamente un dispositivo fotovoltaico con una estructura óxido indio estaño/sulfuro de cadmio/seleniuro de cadmio/plata (ITO/CdS/CdSe/Ag) utilizando herramientas de aspersión por chorro de aire presurizado de bajo costo. La implementación práctica del dispositivo fotovoltaico consistió en la deposición de múltiples capas de material semiconductor sobre un sustrato de vidrio borosilicato utilizando una combinación de deposición pirolítica y goteo en frío. Los resultados obtenidos a partir de las mediciones prácticas mostraron la factibilidad de las herramientas utilizadas para fabricar dispositivos fotovoltaicos experimentales a bajo costo.

Palabras clave—Deposición por rocío pirolítico, dispositivo fotovoltaico, plata, Seleniuro de Cadmio, Sulfuro de Cadmio

Abstract

In the last few years, it has dramatically increased the search for better and economic ways to use different types of renewable energy. In this search, it has been demonstrated that solar energy is a low cost energy with great possibilities for many countries. In Mexico, for example, this type of energy would prosper thanks to the great solar irradiation in most of its territory. Although solar power can be considered a low-cost type of energy, the cost of the solar cells can sometimes stall the advancement of their large-scale use. Cadmium Sulfide thin films have been an attractive option in solar panel manufacturing for several years due to their wide bandgap and ability to absorb much of the solar spectrum. In this work, a photovoltaic device with structure indium tin oxide/cadmium sulfide/cadmium selenide/silver (ITO/CdS/CdSe/Ag) was practically implemented, using low cost pressurized air blast spraying tools. The practical

implementation was realized by the deposition of multiple semiconductor layers in a soda lime glass substrate using a combination of pyrolytic deposition and cold dripping. The result showed the feasibility to fabricate experimental photovoltaic device at low cost using the proposed tools.

Keywords— Cadmium Selenide, Cadmium Sulfide, photovoltaic device, silver, spray pyrolysis deposition.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un país va altamente ligado a la riqueza de sus tierras y a la oportunidad de crecimiento económico que se vea en él. Este crecimiento implica el consumo de energía en grandes cantidades [1] para la realización de procesos de manufactura cuyo consumo principal es de energía eléctrica. En estos últimos años, se han realizado cambios en las estructuras del consumo de energía, buscando la forma de disminuir el consumo de energías fósiles y aumentar la generación y utilización de energías renovables [2], esto en consecuencia a que día a día se pueden observar los estragos ocasionados en el medio ambiente por el consumo descontrolado de hidrocarburos para satisfacer las necesidades energéticas tanto de la industria como de la población. De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía, en el 2021, la energía solar tuvo un crecimiento mundial del 22% en comparación con las otras energías renovables [3]. A pesar de ser un tipo de energía económica, es necesaria una costosa inversión para la instalación del equipo necesario para su correcta utilización [4], como lo es la adquisición de paneles solares, inversores, baterías, etc. Estos costos suelen ser altos debido a los materiales utilizados para la construcción de los dispositivos, principalmente, de las celdas solares.

El alto costo de las celdas suele estar ligado al precio de los materiales con las que están hechas y a los procesos de fabricación. En la búsqueda de disminuir estos costos, se ha optado por herramientas de fabricación con un proceso de manufactura que compita con las celdas solares comerciales [5], también se ha optado por buscar entre distintos materiales de los que destacan los calcogenuros de cadmio [6], los cuales muestran propiedades optoelectrónicas superiores en comparación con otros materiales, como una mayor ventana absorbente [7] y generación de mayor potencia [8], además de que este tipo de materiales pueden ser utilizados en distintas técnicas de deposición de películas delgadas.

En este trabajo, se realizó la fabricación de un dispositivo fotovoltaico con estructura vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag usando herramientas de aspersión por chorro de aire presurizado de bajo costo. La caracterización resultante de los dispositivos fotovoltaicos fabricados demuestra la factibilidad de la utilización de las herramientas utilizadas para la fabricación de dispositivos experimentales de bajo costo, además, al ser un método sencillo, se facilita su utilización para pruebas didácticas de fabricación.

2. EXPERIMENTO

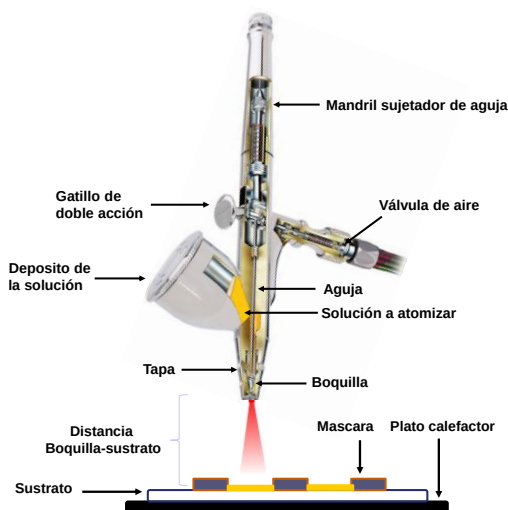
Para la fabricación de los dispositivos fotovoltaicos se utilizaron sustratos de vidrio borosilicato obtenidos de la compañía Techinstro con medidas de 50x25 mm. Los sustratos cuentan con un recubrimiento de ITO de 200 nm, resistividad de 10 Ω /cuadro y transmitancia de >90%. Se utilizó sulfuro de cadmio (CdS) y seleniuro de cadmio (CdSe) en polvo con pureza de 99.9% de la compañía Sigma-Aldrich, así como plata líquida de la compañía SPI. Los disolventes utilizados fueron etilenglicol, etanol y alcohol isopropílico. La herramienta de aspersión por chorro de aire presurizado utilizada es un micro aerógrafo de marca (Truper AERO-35) como el mostrado en la Fig. 1, cuyos parámetros se pueden observar en la Tabla 1 y una plancha de calentamiento Corning Scholar 170. La Fig.2 muestra la estructura del dispositivo fotovoltaico fabricado. Donde se muestra que sobre el sustrato de vidrio con ITO se depositaron las películas de CdS y CdSe para formar la estructura de unión pn del dispositivo fotovoltaico.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de aerógrafo.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Presión de aire	30 – 45 PSI	Diámetro interno de manguera	4mm
Capacidad de deposito	7 ml	Peso	125 g
Diámetro de boquilla	0.3 mm	Dimensiones	19.81 x 9.6 x 13 cm

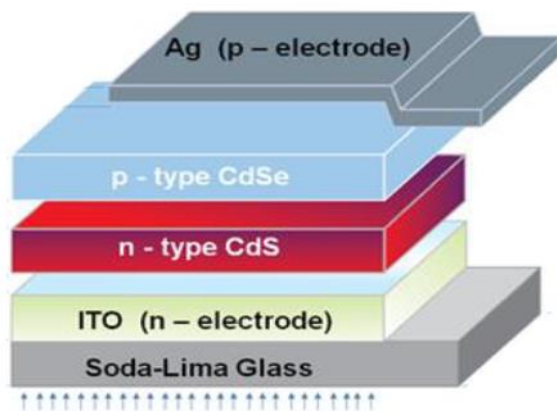
Fuente: Obtenida de especificaciones para Truper AERO-35.

Fig. 1. Micro aerógrafo y sus principales componentes.



Fuente: Obtenido de la referencia [9].

Fig. 2. Estructura del dispositivo fotovoltaico fabricado.



Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

2.1 Preparación los sustratos.

Como paso inicial, los sustratos se limpiaron con alcohol isopropílico para asegurar la eliminación de impurezas en la superficie, y posteriormente se secaron con aire a presión. El equipo de protección utilizado para la deposición fueron guantes de látex, máscaras reutilizables de cartucho 3M para gases peligrosos y lentes. Las deposiciones de las películas fueron realizadas en una campana de extracción para la eliminación de las partículas que pudieran quedar suspendidas en el aire. La limitación del área de depósito en los sustratos se llevó a cabo por medio de cinta térmica y mascarillas de plástico.

2.2 Deposición de películas de CdS, CdSe y Ag.

Para la deposición de la película de CdS se colocó en un recipiente de vidrio esterilizado una mezcla compuesta por 50% CdS, 40% etilenglicol y 10% etanol, esta mezcla fue agitada durante 5 minutos hasta que se obtuvo una solución homogénea, tal como se muestra en la Fig.3. Una vez lista la solución, se colocó el sustrato sobre la plancha térmica durante 30 segundos a ~ 200 °C, pasado este tiempo, el sustrato se movió a la campana de extracción donde se realizó el depositado del CdS por medio del micro aerógrafo, en el cual previamente se vertió la solución homogénea del CdS y los disolventes tal como se muestra en la Fig.4. Para lograr una película uniforme se realizaron 5 ciclos de atomización de la solución hasta cubrir el área deseada del sustrato con ITO. Terminada la deposición, el sustrato se dejó reposar 24 horas dentro de un recipiente cubierto a temperatura ambiente (Fig.5a). Si las películas, después del tiempo de secado, presentaron huecos, se realizó una nueva deposición teniendo cuidado con la presión del aire para no retirar material ya depositado, omitiendo el paso por la plancha calefactora.

Fig. 3. Solución homogénea de 50% CdS, 40% etilenglicol y 10% etanol.



Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

Pasadas las 24 horas, se preparó la siguiente mezcla con los porcentajes 50% CdSe, 40% etilenglicol y 10% metanol, la cual fue agitada hasta obtener una mezcla homogénea sin grumos. Para mejorar la homogeneidad de la solución, se puede realizar el mezclado sobre la plancha a $\sim 50^\circ\text{C}$. Al igual que con la película anterior, la solución de CdSe se colocó en el aerógrafo y fue depositado sobre la película de CdS con el apoyo de una mascarilla con un área menor a la anterior. Al término de la deposición, el sustrato fue regresado a su contenedor y se puso a secar por 24 horas (Fig. 5b).

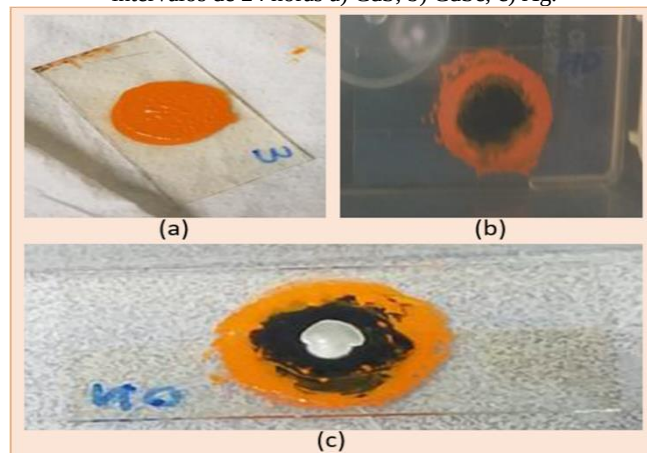
Fig. 4. Deposición con el micro aerógrafo del CdS.



Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

Terminado el tiempo de secado, se continuó con el depósito de la plata sobre la película de CdSe, esta última deposición se realizó mediante la técnica de goteo, aplicado con una pipeta de plástico. Una vez depositada la gota de plata, esta se dispersó utilizando la misma pipeta hasta que se obtuvo el ancho y espesor deseado. Al terminar, el sustrato fue colocado en su recipiente y dejado a secar por 24 horas (Fig. 5c).

Fig. 5. Resultados de depositar entre cada una de las películas con intervalos de 24 horas a) CdS, b) CdSe, c) Ag.



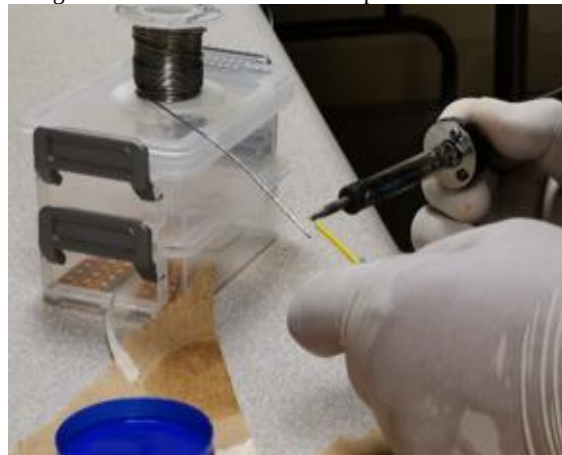
Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

2.3 Horneado y preparación para toma de mediciones.

Al término de la deposición de las tres películas sobre el sustrato, se continuó con el horneado del conjunto. Para el horneado se utilizó la mufla marca Furnace, la cual fue precalentada a 100°C durante 20 minutos antes de colocar dentro el sustrato. El proceso de horneado se realizó durante 15 min a la misma temperatura. Al finalizar, el sustrato fue colocado dentro de un recipiente y se dejó reposar por 24 horas.

Para poder realizar las pruebas de funcionamiento y la caracterización del dispositivo, fue necesario colocar los contactos (ánodo y cátodo) sobre el sustrato. Primero se limpió el sustrato con alcohol isopropílico, teniendo cuidado en no dañar las películas de los materiales. Luego, se cortó un pedazo de cable, el cual funcionó como contacto, se retiró su chaqueta protectora y se estañó como se puede observar en la Fig. 6.

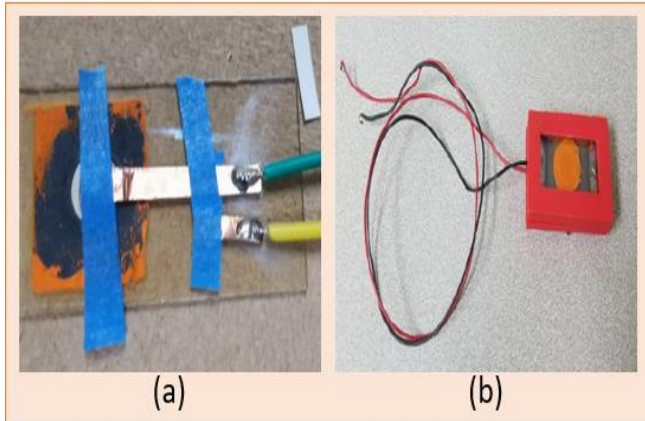
Fig. 6. Colocación de estaño en la punta de cableado.



Fuente: Obtenido de la referencia [8].

Sobre el sustrato se colocaron 2 tiras de cobre para establecer contacto y sobre ellas se soldaron los cables que fueron estañados. Estas tiras fueron cubiertas por uno de sus lados con papel adhesivo para evitar que se ocasionara un corto circuito (Fig. 7a). Para finalizar, la celda se cubrió con cinta para asegurar el contacto de las líneas de cobre y se colocó dentro de su caja de manejo personalizada (Fig. 7b).

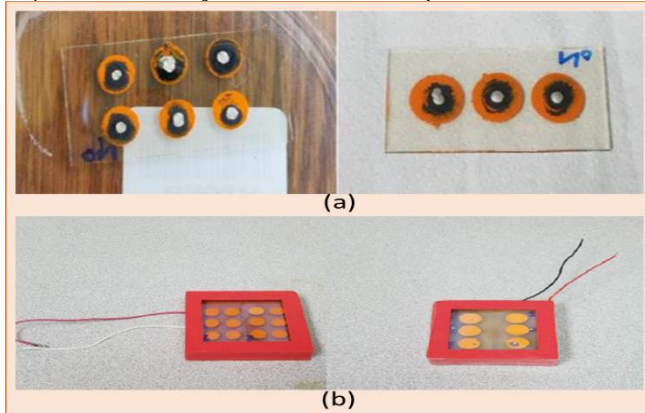
Fig. 7. Preparación de dispositivo para realización de mediciones.
a) Muestra de cableado para dispositivo fotovoltaico unitario.
b) Dispositivo fotovoltaico terminado y listo para toma de mediciones.



Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

Utilizando el mismo procedimiento anterior, se fabricaron múltiples dispositivos fotovoltaico en el mismo sustrato, tal como se muestra en la Fig. 8.

Fig. 8. Preparación de paneles. a) Depósitos para 6 y 3 celdas.
b) Paneles de 12 y 6 fotodiodos listos para caracterización.

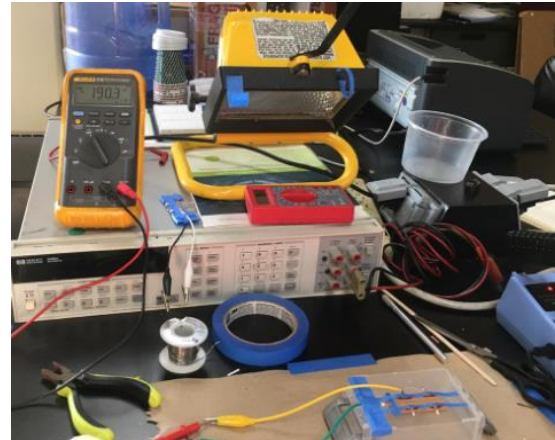


Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

A los dispositivos fabricados se les realizaron mediciones de voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y de la corriente de corto circuito (I_{sc}) y se estimaron el factor de llenado (FF) y la eficacia de conversión (η). Para estas pruebas se utilizó una lámpara de xenón de 100 mW/cm^2 , un conjunto de

resistencias de diferente valor y un multímetro digital HP 3458^a como el que se muestra en la Fig.9. Las Tablas 2 y 3 muestran un resumen de los parámetros de desempeño medidos para el caso de los tres arreglos fabricados; un dispositivo fotovoltaico en un sustrato, seis dispositivos en un sustrato y doce dispositivos en un sustrato. Para el caso de seis dispositivos en el mismo sustrato el arreglo consta de tres mallas en paralelo con dos dispositivos en serie cada malla y para el caso de doce dispositivos el arreglo consta de tres mallas en paralelo con cuatro dispositivos en serie cada malla.

Fig. 9. Equipo de medición para caracterización de los dispositivos fotovoltaicos.



Fuente: Obtenido de la referencia [11].

Tabla 2. Resultados obtenidos de las mediciones prácticas para la caracterización de los dispositivos unitarios y múltiples.

# fotodiodos	V_{oc}	I_{sc}	V_{maxpot}
1	168 mV	142 μA	120 mV
6	200 mV	268 μA	160 mV
12	276 mV	450 μA	225 mV

Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

Tabla 3. Resultados obtenidos de las mediciones prácticas para la caracterización de los dispositivos unitarios y múltiples.

# fotodiodos	I_{maxpot}	FF	η
1	115 μA	0.5786	0.01764%
6	210 μA	0.6268	0.06684%
12	400 mA	0.7246	0.3180%

Fuente: Elaboración propia, tesis de maestría [10].

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se realizó la fabricación de dispositivos fotovoltaicos basados en CdS/CdSe utilizando un aerógrafo de chorro de aire presurizado. Se fabricaron tres arreglos de

dispositivos; un arreglo de un solo dispositivo en un sustrato y dos arreglos con conexiones en serie y paralelo de más de un dispositivo en el mismo sustrato. De los resultados resumidos en las Tablas 2 y 3 es importante notar que a medida que van aumentando el número de dispositivos en el mismo sustrato también va aumentando los valores de los parámetros de desempeño. En especial, se logra un FF de 0.7246 y una η de 0.3180 % para el caso de doce dispositivos en mismo sustrato, A pesar de que la eficiencia es menor a uno, lo que este resultado sugiere es que a medida que se mejora la capacidad de integrar en el mismo sustrato más dispositivos se puede ir mejorando la eficiencia de conversión.

Con respecto a la técnica de fabricación se puede concluir que los resultados muestra la posibilidad de utilizar un aerógrafo comercial como una herramienta de deposición de películas delgadas de CdS y CdSe, sobre un sustrato de vidrio borosilicato con recubrimiento de ITO, de una manera fácil y a bajo costo comparado con la instrumentación y herramientas tales como rectores especiales con cámaras de vacío utilizadas por técnicas de crecimiento epitaxia molecular, pulverización catódica y evaporación térmica. Sin embargo, es importante comentar que las películas depositadas con la técnica usada en este trabajo no lograron cristalizar eficientemente por lo que los dispositivos fabricados son frágiles y pueden sufrir daños si se ejerce demasiada presión en ellos. Adicionalmente, se puede comentar que entre más uniformidad exista en los dispositivos fotovoltaicos múltiples fabricados en mismo sustrato (Fig. 8) puede mejorarse las características de desempeño tal como se reporta en la referencia [6], donde se obtuvo una eficacia cercana a 5.4 para un arreglo de 4 dispositivos en el mismo sustrato.

3.1 Observaciones generales

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

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

4. REFERENCIAS

[1] A.V. Komarova, I.V. Filimonova, A.A. Kartashevich (2022), "Energy consumption of the countries in the context of economic development and energy transition", *Energy Reports*, 8(9), 2022, Pages 683-690, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.072>.
 [2] F. V. Bekun, A. A. Alola, S. A. Sarkodie (2019), "Toward a sustainable environment: Nexus between CO₂ emissions, resource rent, renewable and nonrenewable energy in 16-EU countries", *Science of The Total Environment*, 657, 2019, Pages 1023-1029,

ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.104>.
 [3] IEA (2022), *Solar PV*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-pv>, License: CC BY 4.0.
 [4] IEA (2022), *Renewables 2022*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, License: CC BY 4.0
 [5] V. K. Kapur, B. M. Basol, and E. S. Tseng (1987), "Low Cost Methods for the Production of Semiconductor Films for CuInSe₂/CdS SOLAR CELLS," *Sol. Cells*, 21, pp. 65-72, 1987.
 [6] R. Raj, H. Gupta, and L. P. Purohit (2022), "Performance of V2O5 hole selective layer in CdS/CdTe heterostructure solar cell," *J. Alloys Compd.*, vol. 907, p. 164408, 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2022.164408.
 [7] B. A. Ahmed, I.H. Shallal, F.I. Mustafa Al-attar (2018), "Physical properties of CdS/CdTe/CIGS thin films for solar cell application", *Journal of Physics: Conference Series*, 1032. 012022. 10.1088/1742-6596/1032/1/012022.
 [8] D. L. Bätzner, A. Romeo, H. Zogg, and A. N. Towari (2002), "CdTe / CdS Solar Cell Performance under Low Irradiance," in *17th EC PVSEC Munich October 2001, 2002*, no. October.
 [9] C. Villa-Angulo. (2021). "Self-powered cadmium chalcogenide photodetectors by pressurized air blast spraying", *Optical Materials Express*, 11. 1104. 10.1364/OME.418301.
 [10] M. Vargas-Moreno, C. Villa-Angulo (2018), "Diseño e implementación de un panel de generación de energía eléctrica a partir de celdas solares unitarias de CdS y CdSe", [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California], <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab05865a&AN=cim.231960&lang=es&site=eds-live>.
 [11] V. A. Candelas-Urrea, C. Villa-Angulo, C. García-González (2020), "Diseño e implementación de un panel de generación de energía eléctrica a partir de celdas solares unitarias de CdS y CdTe", [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California], <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab05865a&AN=cim.239802&lang=es&site=eds-live>.