

Materiales foto-resistores sintetizados por crecimiento químico en solución

P.D. Gómez-Barrales¹, A.A. Gutiérrez-Gil¹, M. Serrano-Romero¹, Y. Jiménez-Flores¹, Ma. Del C. Alcántara-Téllez¹, I.R. Chávez-Urbiola¹, M.B. Ortuño-López¹

¹Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro.

Correspondencia: monica.ol@queretaro.tecnm.mx

Resumen

Se sintetizaron y procesaron materiales para el diseño de sensores de radiación o también llamados foto-resistores, mediante métodos químicos de crecimiento en solución DBQ y SILAR. Se caracterizaron las propiedades ópticas y eléctricas de películas delgadas de PbS, CdS y ZnS. Se fabricaron foto-resistores de PbS, se valoraron eléctricamente en diferentes condiciones. Así, se observó un claro efecto en la resistividad dependiente de la intensidad lumínica. Se analizó estadísticamente la producción de estos sensores, para lo cual se observó una mínima dispersión con respecto a su producción. Con los datos obtenidos y un proceso estable para una producción a baja escala de sensores que cumplen con las características necesarias de dispositivos funcionales. Para las películas de CdS y ZnS, se realizaron dos tipos de perfiles de impurificación con Cu, a fin de conseguir efectos en sus propiedades eléctricas, que permitieran incrementar sus propiedades como fotosensores. Las películas de CdS:Cu y ZnS:Cu son películas semiconductoras con características ópticas y eléctricas apropiadas para el diseño de componentes electrónicos, como: fotosensores, transistores y diodos. La modificación y sintonización de su ancho de banda de energía prohibida (E_g) y variaciones significativas en la resistencia eléctrica, ambas como función tanto del perfil del dopaje como del espesor de los materiales permitirán implementar este tipo de películas en dispositivos electrónicos.

Palabras Clave: foto-resistores, PbS, CdS, ZnS, DBQ, SILAR.

Abstract

Materials for the design of radiation sensors or also called photo-resistors were synthesized and processed by DBQ and SILAR solution growth chemical methods. The optical and electrical properties of PbS, CdS and ZnS thin films were characterized. PbS photo-resistors were fabricated, electrically evaluated under different conditions, a clear effect on the light intensity dependent resistivity was observed. The production of these sensors was statistically analyzed, for which a minimum dispersion with respect to their production was observed. With the data obtained and a stable process for a low-scale production of sensors fulfill the necessary characteristic of functional devices. For the CdS and ZnS films, two types of impurification profiles with Cu were performed, looking for effects on their electrical properties, which would increase their properties as photosensors. CdS:Cu and ZnS:Cu films are semiconductor films with optical and electrical characteristics suitable for the design of electronic components, such as: photosensors, transistors and diodes. The modification and tuning of their bandwidth of forbidden energy (E_g) and significant variations in electrical resistance, both as a function of both the doping profile and the thickness of the materials, will allow the implementation of this type of films in electronic devices.

Keywords: Photo-resistors, PbS, CdS, ZnS, DBQ, SILAR.

Introducción

Recientemente, la demanda de productos electrónicos se ha visto incrementada debido al actual aumento de las necesidades remotas a nivel mundial, donde son indispensables dispositivos tecnológicos de comunicación. Taiwán, Corea del Sur y otros países del bloque Asia-Pacífico, considerados como potencias en la manufactura de componentes y dispositivos electrónicos (Zavala, 2014), han enfocado sus esfuerzos para la satisfacción de la alta demanda en dispositivos personales como teléfonos celulares y laptops entre otros. Esta dificultad ha afectado severamente a algunos otros sectores económicos, que también requieren de las tecnologías de la industria electrónica.

La escasez de componentes semiconductores, los cuales son parte de los suministros del sector automotriz, ha llevado a pérdidas millonarias a las empresas productoras por ventas no realizadas en el 2021. Otros factores, como la presencia de la pandemia por el virus SARS-Cov-2 (COVID-19), provocaron la afectación de varias cadenas de producción de microprocesadores para automóviles; lo cual afectó la economía nacional en México y en las naciones productoras del mundo (Kelion, 2021; Biswas R., 2021).

Esta problemática local y mundial ha generado reflexiones sobre las áreas de oportunidad de este subsector de la industria electrónica, el cual debe satisfacer altas demandas y, al mismo tiempo, implementar tecnologías más económicas y amigables con el medio ambiente. En las últimas décadas, las síntesis de películas delgadas con propiedades semiconductoras han sido objeto de arduo estudio por su gran potencial de aplicaciones, considerando incluso la incorporación de técnicas de fabricación y procesamiento más sostenibles.

Los semiconductores obtenidos y procesados adecuadamente tienen la capacidad de modular sus propiedades ópticas y eléctricas para diferentes necesidades. Así que una película delgada semiconductoras de un material determinado de espesores en la escala nanométrica (20-100 nm)

presenta fenómenos especiales que no se presentan en un material en “bulk” o en volumen, con efectos significativos interesantes en las propiedades de dicho material (Mazón, 2009).

Las películas delgadas de semiconductores tienen aplicaciones que van desde sensores de radiación, como los detectores de IR, UV, visible, gamma, entre otros y aplicaciones como polarizadores, (Pathan, H. M., & Lokhande, C. D., 2004), diodos (Willars-Rodríguez, 2020), hasta transistores de películas delgadas (TFT) (Arreola-Jardón, G. et al., 2010) y celdas solares (Liu, F et al., 2010).

Existen diversos métodos para el crecimiento de estos materiales, dentro de los cuales destacan la erosión catódica, deposición química en fase vapor, ablación láser (Kelly, 2000; Shishir et al, 2011) entre otras. El primero involucra un bombardeo de partículas altamente energéticas sobre el material fuente para que éste sea adherido sobre un sustrato, lo que requiere condiciones de vacío para la inmersión de gases inertes y altos requerimientos energéticos. En el segundo y el tercer método se depositan las especies químicas mediante un gas portador y, al igual que el primero, deben asegurar condiciones de alto vacío para el control de la pureza de los materiales producidos. Éstos son sólo algunos ejemplos de las técnicas convencionales de la industria electrónica, cuyo grado de sofisticación por instrumentación y el riguroso control de calidad que exige su práctica, representan un coste económico y ambiental muy alto.

Las películas delgadas de halógenos en especial de sulfuros de metales tales como: el sulfuro de cadmio (CdS), sulfuro de plomo (PbS) y sulfuro de zinc (ZnS) han sido sintetizadas por métodos más sostenibles, como los basados en la técnica de Depósito en Baño Químico (DBQ) que consiste en reacciones en solución acuosa, donde interfieren agentes químicos precursores de iones del metal y de iones de azufre. También incluyen una fuente de iones hidroxilo para el ajuste del pH del sistema y un agente complejante de los iones metálicos libre en solución. La función del agente complejante es retardar la disponibilidad de los iones metálicos y con ello controlar la formación gradual de la película. Asimismo, puede ser útil la

presencia de una solución amortiguadora, para controlar los cambios de pH que alteren los equilibrios fisicoquímicos favorables para la adhesión y crecimiento de la película.

DBQ es una técnica muy versátil, de bajo costo y temperatura, de sencilla instrumentación, y con alto potencial para ser escalable (Oliva, Corona, Patiño & Oliva-Avilés, 2014). Por métodos de DBQ es posible la obtención de películas semiconductoras de buena calidad, homogéneas y bien adheridas a su sustrato, en temperaturas desde la ambiental y hasta 90° C y sin liberación de gases tóxicos al ambiente y equipos de vacío (Díaz-Grijalva et al., 2020).

Por otra parte, la técnica SILAR (Reacción y Absorción Sucesiva de Capas Iónicas), ha demostrado su eficiencia en el dopaje de películas delgadas semiconductoras con una gran variedad de elementos en diferentes proporciones (Pathan & Lokhande, 2004). La técnica de SILAR funciona bien en condiciones ambientales de temperatura y presión, por lo que es aún más sencillo y económico que DBQ. En este proceso las películas son obtenidas simplemente mediante la inmersión de los sustratos en las soluciones acuosas de los iones precursores (Pathan & Lokhande, 2004).

El CdS presenta un *band gap* cercano a los 2.5 eV a temperatura ambiente (Senthil, Mangalaraj & Narayandass, 2001), con un borde de absorción característico cercano a los 500 nm, con un carácter del tipo n. Aunque existen reportes donde se ha logrado un cambio a un tipo p (Heredia Cancino, 2013), ésto dependiendo de las condiciones de depósito o dopaje. Las películas obtenidas mediante DBQ, presentan resistividades del orden de los $10^8 - 10^{10} \Omega cm$ (Khallaf et al., 2009), por lo que son altamente resistentes al paso de la corriente eléctrica, no obstante, la inclusión de cierto tipo de impurezas puede tener efectos directos en esta propiedad. El sulfuro de cadmio dopado con cobre ha sido reportado como un material fotosensible debido a su ancho de banda en el visible. Este fenómeno se puede apreciar en un incremento en su resistividad eléctrica en la obscuridad, y una disminución cuando es iluminado (Díaz-Grijalva, et al., 2020); lo que es una

característica necesaria en los componentes foto-resistores comerciales.

Otro material que ha demostrado ser útil en el diseño de foto-resistores es el PbS el cual tiene un band gap bajo de 0.41 eV, lo que explica su alta sensibilidad a la radiación en el infrarrojo (Choudhury & Sarma, 2008). El PbS es un poco menos resistivo, en comparación con el CdS, con valores en el intervalo los $10^5 - 10^6 \Omega cm$ (Pentia, Pintilie, Matei, Botila & Ozbay, 2001). Dependiendo de la técnica y su depósito pueden variar sus características, por general por DBQ es un semiconductor del tipo p (Cohen, 2018). También para este material se ha reportado la inclusión de impurezas que producen una alteración en su ancho de banda prohibida y propiedades eléctricas, lo que lo transforma en un material más conductivo.

Por su parte el ZnS es un material con propiedades similares al CdS (Saidzhonov, B. y col., 2019), con la ventaja de que el ZnS no ha sido considerado nocivo para la salud. Es un semiconductor tipo n, que por sus propiedades ópticas puede ser aplicado como ventana en componentes optoelectrónicos (Bergstresser, T. K., & Cohen, M. L., 1967). Presenta un borde de absorción característico cercano a 340 nm, band gap de 3.6 eV a temperatura ambiente (Ves, S. y col., 1990); se ha reportado que este valor puede modularse entre 3.8 y 3.9 eV, en función del control de la estructura en que cristaliza, zinc blenda o wurtzita (Xiaosheng et al, 2011).

Heywang & Schauer (1974) señalaron que el desarrollo de las tecnologías de materiales electrónicos se asocia directamente a la miniaturización, la confiabilidad y al amplio rango de aplicaciones potenciales. Las bajas escalas dimensionales en los circuitos diseñados con elementos de película delgada disminuyen la resistencia eléctrica entre los componentes.

En términos generales un foto-resistor o también llamado fotosensor, es un componente que tiene la propiedad de variar su valor de resistencia dependiendo de la intensidad de luz. La resistencia disminuirá cuando la intensidad de luz sea grande, y

aumentará cuando la intensidad disminuya (Díaz-Grijalva et al., 2020).

En este proyecto se obtuvieron y caracterizaron materiales para dispositivos foto-resistores de película delgada, se desarrollaron foto-resistores de PbS. Los métodos de síntesis y procesamiento incluyeron respectivamente las técnicas de DBQ y SILAR para la incorporación de cobre como agente impurificante de las películas de CdS y ZnS. Determinaron propiedades ópticas y eléctricas, y se evaluó la reproducibilidad de las propiedades de los componentes acondicionados.

Metodología

Obtención de las películas

La obtención de las películas semiconductoras se llevó a cabo mediante varios métodos basados en la técnica DBQ. Se detallan a continuación los parámetros experimentales de cada método.

Sulfuro de Plomo

En un vaso de precipitado se añadieron en orden las siguientes sustancias: 10 ml de nitrato de plomo (0.25M), 10 ml de hidróxido de potasio (1M), 2 ml de trietanolamina (1M) y 6 ml de tiourea (1M) y c.b.p. 80 ml de agua desionizada. Luego, cinco sustratos fueron colocados en el reactor inmerso en un baño a una temperatura de 50° C. Debido a la fotosensibilidad de la reacción, el reactor fue protegido de la luz ambiental. Las películas fueron obtenidas luego de tres horas de depósito.

Sulfuro de Cadmio

Con base en el trabajo publicado por Contreras y colaboradores (2018), la fórmula de depósito fue la siguiente: 20 ml de cloruro de cadmio (0.05M), 2.5 ml de citrato de sodio (1M), 0.5 ml de hidróxido de potasio (1M), 10 ml de Buffer de Borato, 5 ml de tiourea (1M) y c.b.p. 50 ml de agua desionizada. Se obtuvieron cinco películas de 90 minutos de depósito, crecidas a una temperatura de 80 °C.

Sulfuro de Zinc

En un vaso de precipitado se añadieron en orden las siguientes sustancias: 10 ml de sulfato de zinc (0.1M), 10 ml de citrato de sodio (0.5M), 2 ml de hidróxido de potasio (0.5M), 10 ml de solución buffer pH-10 y 15 ml de tiourea (0.5M) y c.b.p. para 50 ml de agua desionizada. Se obtuvieron cinco películas de 18, 30, 60, 90 y 120 minutos de depósito, crecidas a una temperatura de 70 °C.

Procesamiento de las películas de CdS y ZnS

En el caso de las películas de CdS y ZnS, que tienen una naturaleza altamente resistiva, se aplicó un tratamiento para la incorporación de Cu a la estructura superficial de los materiales, buscando mejorar su conductividad eléctrica. El método SILAR se aplicó para lograr el dopaje de los materiales mediante la inmersión de las películas en una solución de nitrato de cobre (0.1M).

Para el dopaje de estos materiales, se establecieron dos tipos diferentes de perfiles, para el caso del ZnS la inmersión en la solución de iones de cobre, fue de 8 segundos para toda la serie de películas de espesores diferentes. Para el CdS, se varió el tiempo de inmersión de 8, 12 y 16 segundos, conservando constante el espesor de las películas.

Acondicionamiento de películas de PbS para los foto-resistores

Una vez que las películas fueron obtenidas y con ayuda de un cortador de vidrio con punta de diamante, éstas fueron cortadas a la medida de 1 cm². Luego se dibujaron contactos en los extremos paralelos de los componentes con tinta conductiva de cobre, plata y platino.

Caracterización óptica y eléctrica

Se analizaron las propiedades ópticas de las películas depositadas, mediante un Espectrofotómetro UV-VIS (*Hatch DR6000*). Como parte esencial de esta caracterización óptica, se determinó la energía de banda prohibida (Eg), estimada mediante datos de absorción a través de interpolación lineal de la gráfica de $Tauc [(αhv)^2 vs hv]$.

Una vez acondicionados los componentes, se determinó la resistencia eléctrica empleando un multímetro digital de la marca *Keithley 2110-120*. Se utilizó el software *KickStart 2* para configurar los parámetros del método de medición empleado para esta caracterización eléctrica, siendo de 0 a 300 segundos el intervalo de tiempo de medición y 100 mediciones para dicho período de tiempo. El instrumento tomó mediciones de resistencia eléctrica bajo dichos parámetros, para cada uno de los componentes, tanto en condiciones de iluminación como de oscuridad.

Se determinaron medidas de dispersión estadística en las propiedades eléctricas de los componentes, para evaluar la repetibilidad de la resistencia eléctrica de los foto-resistores fabricados.

Resultados

Evaluación de foto-resistores de PbS

La Figura 1 muestra la imagen de una serie de veinte foto-resistores de película fina de PbS obtenidas por la metodología aquí reportada.

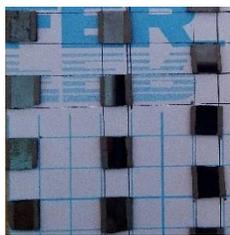


Figura 1. Foto-resistores de PbS acondicionados por un método manual con contactos de pintura conductiva de Cu, Ag y Pt. Fuente: elaboración propia.

La caracterización óptica de los foto-resistores de PbS se realizó a partir de una técnica de Espectroscopía de Reflexión y Transmisión con la que se identificó el borde de absorción característico ubicado alrededor de los 625 nm. También se logró cuantificar una alta reflexión de la región ultravioleta, visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético (35 al 60 %). Por lo que estos materiales pueden también servir como buenos filtros de la radiación.

En la Figura 2, en los incisos a) y b) se muestran los resultados de la resistencia eléctrica promedio de los

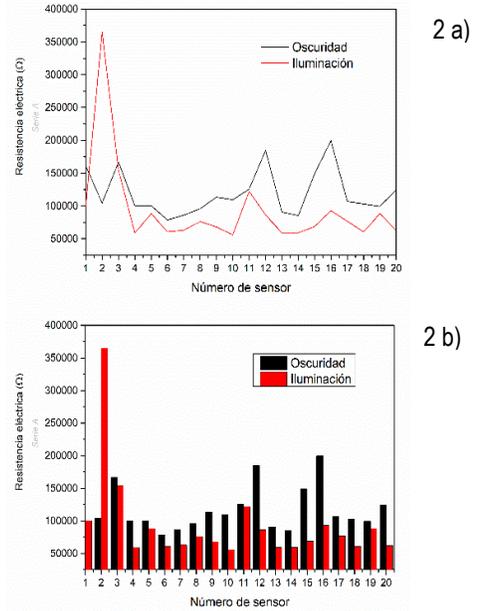


Figura 2. Resistencia eléctrica de los foto-resistores de PbS en condiciones de iluminación y oscuridad. Fuente: elaboración fotosensores de PbS en condiciones de iluminación y de obscuridad.

De la Figura 2 a) es clara la tendencia en la disminución de la resistencia eléctrica cuando los

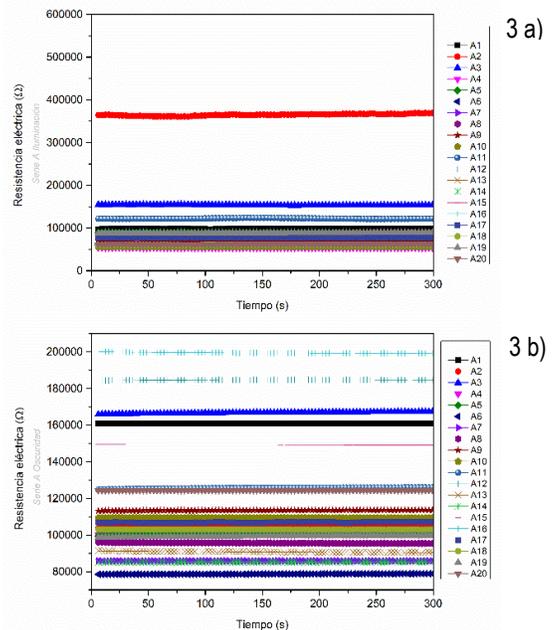


Figura 3. Resistencia eléctrica de los foto-resistores serie A medidas en condiciones de iluminación (a) y oscuridad (b) en función del tiempo. Fuente: elaboración propia.

sensores son expuestos a la iluminación, mientras que su resistencia es mayor en la oscuridad. Lo anterior

demuestra que los sensores tienen potencial para funcionar como foto-resistores (Díaz-Grijalva, et al., 2020). No obstante, se observan una dispersión significativa de la resistencia eléctrica entre algunos componentes, que claramente puede atribuirse al método manual de acondicionamiento.

La Figura 3 muestra el comportamiento eléctrico de los sensores medidos en condiciones de oscuridad e iluminación como una función del tiempo. Resulta interesante la homogeneidad de la propiedad eléctrica de todos los sensores en el tiempo. Se puede observar de nuevo la dispersión de los datos entre sensores, que resulta aún más significativa en condiciones de oscuridad (3b). En condiciones de iluminación (3a), exceptuando el sensor número dos, el grupo de sensores presentan mucho menor dispersión en los datos de resistencia eléctrica en los cinco minutos de medición.

Estos resultados corroboran lo antes analizado: el método de acondicionamiento manual de los sensores no es óptimo, la heterogeneidad de la aplicación manual de la pintura conductiva y las diferencias en las distancias entre los contactos afectaron la precisión de la respuesta de los foto-resistores. Sin embargo, se insiste en la homogeneidad de los datos de resistencia eléctrica en el tiempo, la cual es una característica que, sí se puede relacionar con la calidad de los materiales sintetizados de forma independiente a las áreas de oportunidad del método de acondicionamiento manual.

Al valorar la resistencia eléctrica, ahora por área de muestra, es posible identificar tres grupos que presentan valores similares en condiciones de oscuridad, tal como se muestra en la Figura 4. Estas similitudes son consistentes con los espesores obtenidos.

La Figura 5 muestra una propuesta de aplicación de estos foto-resistores. Es un circuito acondicionado para un LDR que puede excitar la base de un transistor BC548 si hay una incidencia de luz. Como resultado, un LED se enciende cuando hay luz y se apaga cuando no la hay.

Adicionalmente y como parte de la evaluación de los foto-resistores, se realizó el diseño y fabricación de un dispositivo de iluminación solar que incluyó uno de los componentes desarrollados, el cual se muestra Figura 6.

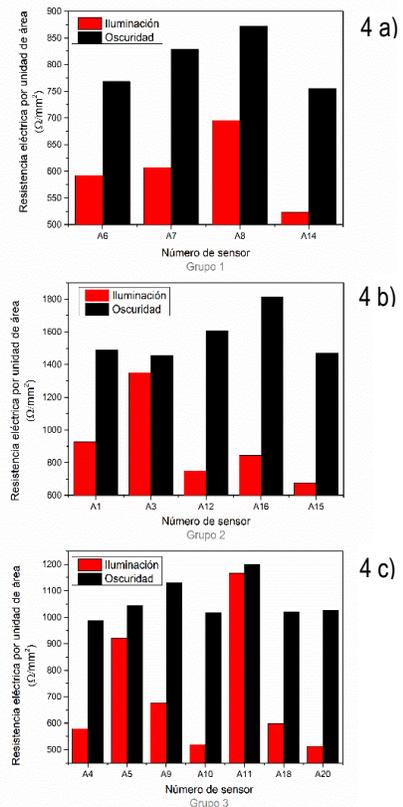


Figura 4. Resistencia eléctrica por unidad de área (mm^2) de los foto-resistores en condiciones de oscuridad y de iluminación de grupos de sensores iguales espesores. Fuente: elaboración propia.

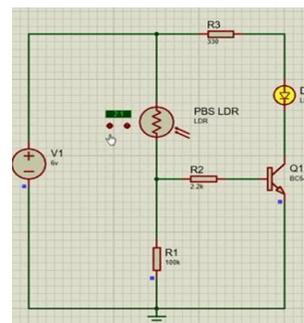


Figura 5. Circuito para la aplicación del fotosensor LDR de película delgada de PbS. Fuente: elaboración propia.



Figura 6. Dispositivo de iluminación solar funcional, que incluye en su diseño uno de los foto-resistores de PbS desarrollados en este proyecto. Fuente: elaboración propia.

El dispositivo presentó resultados positivos, logrando encender o apagar un LED en función de las condiciones de iluminación alrededor del sensor. La activación de la señal depende de la lectura que realiza un pin analógico esp32. En otras palabras, la lámpara permanece apagada en condiciones de iluminación, pero cuando el sensor es aislado de la radiación solar, la lámpara se enciende.

Evaluación de CdS impurificado con Cu (CdS:Cu)

La figura 7 muestra los resultados de la caracterización óptica de las películas de CdS. Los espectros de transmisión fueron generados mediante espectroscopía UV-Vis, obteniendo datos en función de la longitud de onda de la radiación de todo el espectro visible y parte del ultravioleta e infrarrojo cercano, para las películas de CdS dopadas con iones de cobre en tiempos variables de impurificación de 4, 8, 12 y 16 segundos.

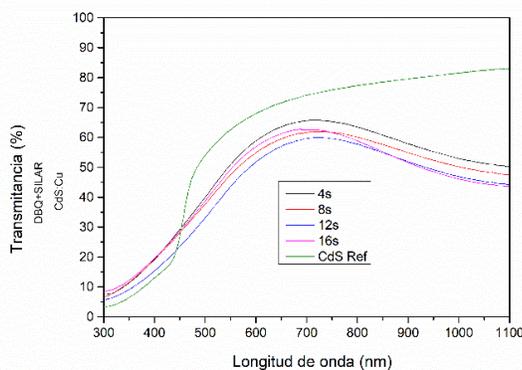


Figura 7. Espectros de transmisión de las películas de CdS (90 min) dopadas con Cu mediante SILAR. Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los espectros de la figura 7, los materiales obtenidos conservan propiedades de transmisión similares a las películas de CdS sin dopar. Encontramos que se trata de recubrimientos con alto grado de transparencia en la región visible, aunque menor al grado de transmitancias del recubrimiento de CdS puro, que alcanza el 75 a 80 % de transmisión. También se observa que los recubrimientos son opacos en la región del ultravioleta con un borde alrededor de los 500 nm.

Mediante el método de *Tauc* se determinó la energía de la banda gap (E_g) de las películas. De los resultados de la Tabla 1, se puede apreciar una tendencia en la disminución de la E_g con la incorporación de cobre, efecto que se pierde a los 16 segundos de procesamiento.

CdS: Cu 4 s	CdS: Cu 8 s	CdS: Cu 12 s	CdS: Ref. 90 min
2.674	2.649	2.603	2.636

Tabla 1. Band gaps (eV) correspondientes a los diferentes tiempos de dopaje mediante SILAR para películas de CdS. Fuente: elaboración propia.

La caracterización eléctrica preliminar de estos materiales se demuestra que el dopaje con Cu tiende a disminuir la resistividad eléctrica del material en magnitudes de unidades de mega ohms a kilo ohms. Lo anterior, clarifica el gran potencial para la aplicación de estos materiales en el diseño de fotosensores de CdS:Cu.

Evaluación de ZnS impurificado con Cu (ZnS:Cu)

Macroscópicamente las películas de ZnS cambiaron de incoloras a color ámbar como consecuencia del tratamiento SILAR con Cu. En la Figura 8 se muestra el espectro de transmisión de las películas delgadas de ZnS dopadas con cobre, mostrando la alta transmisión esperada en todo el espectro UV-Vis, y aún mayor para la película de ZnS sin dopar, también como se esperaba por el análisis macroscópico de sus características ópticas.

En estos espectros se aprecia el borde de absorción característico del ZnS, ubicado cerca de los 346 nm. Se observa también la influencia del tiempo de depósito en el índice de crecimiento o espesor de los recubrimientos, en términos generales, a mayor tiempo de depósito mayor espesor, mayor absorción y menor transmisión.

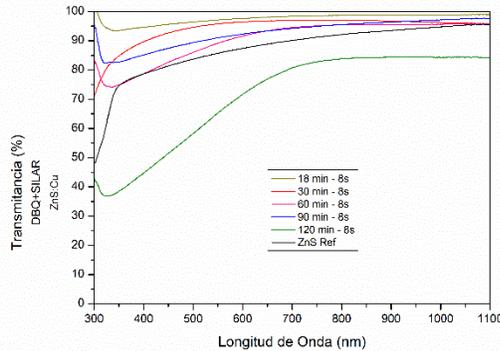


Figura 8. Espectros de transmisión de las películas de ZnS dopadas con Cu mediante SILAR. Fuente: elaboración propia.

La Figura 9 muestra la gráfica de $Tauc$ para el cálculo de las E_g de las películas de ZnS:Cu. Nótese el efecto en la modificación de esta propiedad con el aumento de depósito de la película de ZnS. Por estos resultados, se pueden esperar efectos similares en las propiedades eléctricas de este material y, en consecuencia, un buen comportamiento de estos materiales como foto-resistor controlando su espesor.

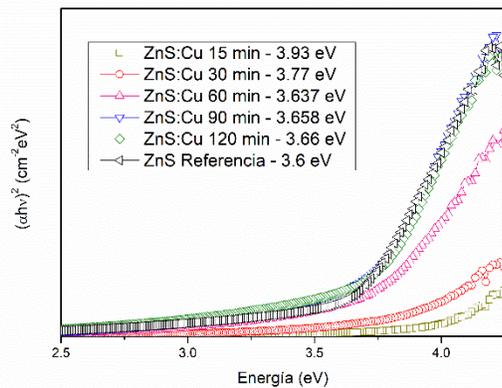


Figura 9. Gráfica de $Tauc$ para el cálculo de E_g de ZnS:Cu. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se diseñaron, fabricaron y caracterizaron óptica y eléctricamente foto-resistores de película delgada de PbS. Las propiedades eléctricas medidas en condiciones de iluminación y oscuridad de cada foto-resistor de PbS son consistentes con la respuesta esperada para un material fotosensible. Se demostró la estabilidad de las propiedades eléctricas a lo largo del tiempo de estos foto-resistores de PbS. La dispersión de los datos de resistencia eléctrica entre componentes muestra que existen oportunidades de mejora en la metodología de acondicionamiento manual de los sensores.

Se realizó la síntesis, procesamiento y caracterización óptica de las películas dopadas de CdS y ZnS, demostrando con ello el gran potencial de CdS:Cu y ZnS:Cu como componentes electrónicos funcionales. La disminución del E_g debidos a la incorporación de Cu, se pueden correlacionar teóricamente con la disminución de la resistencia eléctrica de estos materiales.

Como perspectiva y seguimiento inmediato de este trabajo de investigación, queda la fabricación, acondicionamiento y evaluación eléctrica de componentes foto-resistores de CdS:Cu y ZnS:Cu.

Agradecimientos

Nuestro reconocimiento al Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al Departamento de Metalmecánica, quienes nos brindaron su apoyo a través de jefes y auxiliares del Laboratorio Integral de Materiales y Nanotecnología y del Laboratorio de Mecánica. Agradecemos al Ing. Héctor Ruiz Espino, al Mtro. José Fernando Morones, a la Dra. Cynthia Graciela Flores Hernández, al Dr. Daniel Armando Serrano Huerta, a Juan Carlos Méndez Méndez y a Jesús Orduña Guerrero.

Agradecemos al Programa de *Nuevos Talentos Científico Tecnológico* del Estado de Querétaro, y a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del TecNM Campus Querétaro.

El más especial de los agradecimientos a Mauricio Gabriel Santillán Pacheco, por el diseño y fabricación del prototipo mínimo viable de lámpara solar, así como por el diseño de la imagen de la marca *Fox Technologies* (registro ante el IMPI en trámite).

Referencias

- Arreola-Jardón, G., González, L., García-Cerda, L., Gnade, B., Quevedo-López, M., & Ramírez-Bon, R. (2010). Ammonia-free chemically deposited CdS films as active layers in thin film transistors. *Thin Solid Films*, *519*(1), pp. 517–520. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.08.097>
- Bergstresser, T. K., & Cohen, M. L. (1967). Electronic Structure and Optical Properties of Hexagonal CdSe, CdS, and ZnS. *Physical Review*, *164*(3), pp. 1069–1080. <https://doi.org/10.1103/physrev.164.1069>
- Biswas, R. (2021, 26 julio). Global electronics industry faces continuing supply disruptions. IHS Markit. Recuperado de: <https://ihsmarkit.com/research-analysis/global-electronics-industry-faces-continuing-supply-disruptions-Jul21.html>
- Choudhury, N., & Sarma, B. (2011). Structural analysis of chemically deposited nanocrystalline PbS films. *Thin Solid Films*, *519*(7), pp. 2132–2134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.11.003>
- Cohen Cancio, F. J. (2018). Fabricación y caracterización de la celda solar con estructura PbS/CdS depositada por el método de baño químico [Tesis de Maestría]. Universidad de Sonora. Recuperada de: http://148.225.114.121/bitstream/unison/3329/1/cohencancio_franciscojaviern.pdf
- Contreras Serrato, A., Copado Padilla, B. P., Ortuño López, M. B., Barreiro Rodríguez, G., & Sánchez, J. (2018). Estudio de condiciones idóneas para la síntesis química sostenible de materiales semiconductores con propiedades optoelectrónicas, estudio de repetibilidad. *NTHE*, pp. 81–86. Recuperado de: <http://www.nthe.concyteq.edu.mx/>
- Díaz-Grijalva, O. I., Berman-Mendoza, D., Flores-Pacheco, A., López-Delgado, R., Ramos-Carrasco, A., & Alvarez-Ramos, M. E. (2019). Cu-doped CdS thin films by chemical bath deposition and ion exchange. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *31*(2), pp. 1722–1730. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02690-2>
- Heredia Cancino, J. A. (2013). Efecto del tratamiento térmico con cloruro de cadmio sobre películas de CdS libres de amonio. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Sonora. Repositorio UNISON. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/1408>
- Heywang, H., & Schauer, A. (1975). State of the Art of Thin Film Components. *ElectroComponent Science and Technology*, *2*(1), pp. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.1155/apec.2.61>
- Kelion, L. (10 de 02 de 2021). BBC NEWS MUNDO. Recuperado de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-55955119>
- Khallaf, H., Chai, G., Lupan, O., Chow, L., Park, S., & Schulte, A. (2009). Characterization of gallium-doped CdS thin films grown by chemical bath deposition. *Applied Surface Science*, *255*(7), pp. 4129–4134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.115>
- Liu, F., Lai, Y., Liu, J., Wang, B., Kuang, S., Zhang, Z., Li, J., & Liu, Y. (2010). Characterization of chemical bath deposited CdS thin films at different deposition temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, *493*(1–2), pp. 305–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.12.088>
- Mazón Montijo, D. A. (2009). *Síntesis de películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS) en diferentes sustratos por depósito en baño químico (DBQ): estudio de su proceso de crecimiento* [Tesis de Maestría]. Universidad de Sonora.
- Oliva, A. I., Corona, J. E., Patiño, R., & Oliva-Avilés, A. I. (2014). Chemical bath deposition of CdS thin films doped with Zn and Cu. *Bulletin of Materials Science*, *37*(2), pp. 247–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-014-0642-9>
- Pathan, H. M., & Lokhande, C. D. (2004). Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *Bulletin of Materials Science*, *27*(2), pp. 85–111. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02708491>
- Willars-Rodríguez, F., Chávez-Urbíola, I., Ramírez-Bon, R., Vorobiev, P., & Vorobiev, Y. (2020). Effects of aluminum doping in CdS thin films prepared by CBD and the performance on Schottky diodes TCO/CdS:Al/C. *Journal of Alloys and Compounds*, *817*, pp. 152740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152740>
- Kelly, P., & Arnell, R. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, *56*(3), pp. 159–172. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0042-207x\(99\)00189-x](https://doi.org/10.1016/s0042-207x(99)00189-x)
- Kumar, S., McEvoy, N., Kim, H. Y., Lee, K., Peltekis, N., Rezvani, E., Nolan, H., Weidlich, A., Daly, R., & Duesberg, G. S. (2011). CVD growth and processing of graphene for electronic applications. *physica status solidi (b)*, *248*(11), pp. 2604–2608. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.201100179>
- Pentia, E., Pintilie, L., Matei, I., Botila, T., & Pintilie, I. (2003). Combined chemical-physical methods for enhancing IR photoconductive properties of PbS thin films. *Infrared Physics & Technology*, *44*(3), pp. 207–211. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1350-4495\(02\)00225-6](https://doi.org/10.1016/s1350-4495(02)00225-6)
- Saidzhonov, B., Kozlovsky, V., Zaytsev, V., & Vasiliev, R. (2019). Ultrathin CdSe/CdS and CdSe/ZnS core-shell nanoplatelets: The impact of the shell material on the structure and optical properties. *Journal of Luminescence*, *209*, pp. 170–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.01.052>

- Senthil, K., Mangalaraj, D., & Narayandass, S. (2001). Structural and optical properties of CdS thin films. *Applied Surface Science*, 169-170, pp. 476–479. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(00\)00732-7](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(00)00732-7)
- Ves, S., Schwarz, U., Christensen, N. E., Syassen, K., & Cardona, M. (1990). Cubic ZnS under pressure: Optical-absorption edge, phase transition, and calculated equation of state. *Physical Review B*, 42(14), 9113–9118. <https://doi.org/10.1103/physrevb.42.9113>
- Fang, X., Zhai, T., Gautam, U. K., Li, L., Wu, L., Bando, Y., & Golberg, D. (2011). ZnS nanostructures: From synthesis to applications. *Progress in Materials Science*, 56(2), 175–287. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.10.001>
- Zavala Aznar, G. (2014). *Industria Electrónica*. Ciudad de México: ProMéxico. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76339/141216_DS_Electronico_ES.pdf