

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Instituto de Ingeniería y Tecnología
Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura



**Desarrollo de la familia de semiconductores calcogenuros para el
diseño de dispositivos de electrónica flexible**

Proyecto que presenta

M.I. Joam Manuel Rincón Zuluaga

Como requisito parcial para obtener el grado de

Doctor en Tecnología

Bajo la Dirección de la

Dra. Amanda Carrillo Castillo

Y la Codirección del

Dr. José Mireles Jr. García

Y la Coasesoría externa del

Dr. David Guzmán Caballero

Ciudad Juárez, Chih

Agosto 2023

Palabras clave.

Depósito de baño químico, calcogenuros, fotolitografía, transistores de película delgada, electrónica flexible.

Keywords.

Chemical bath deposition, chalcogenides, photolithography, thin-film transistors, flexible electronics.

Resumen

En el presente trabajo se muestra la caracterización óptica, de espesor y eléctrica de los semiconductores tipo N y P de la familia de los calcogenuros para mejorar el proceso de fabricación de dispositivos electrónicos mediante fotolitografía. Los semiconductores fueron depositados mediante la técnica de baño químico (CBD) para lograr semiconductores tipo P como CuS (37°, 30 minutos) y PbS (40°, 14 minutos), y semiconductores tipo N como CdS (43°, 33 minutos); todos los semiconductores sintetizados tuvieron depósitos de 1, 2 y 3 baños. Los estudios ópticos se realizaron con un nuevo método llamado *método de Tauc modificado*, el cual mostró que el bandgap de los calcogenuros varía de 2.37 a 2.77 eV para transiciones de banda directa, los cuales aumentan conforme el espesor lo hace. Los estudios del perfil de las películas delgadas se realizaron mediante una técnica novedosa denominada perfilometría óptica, la cual estima dimensiones en el rango de 20.34 a 126.81 nm de espesor de las películas delgadas; los espesores de los semiconductores aumentaban conforme aumentaba el número de baños químicos. Los estudios eléctricos realizados sobre los semiconductores sintetizados mediante el método de 2 puntas mostró un amplio rango de resistividad de los calcogenuros, entre $10^{-3} - 10^0 \Omega\text{m}$, siendo esta una aproximación burda; la técnica de 4 puntas mostró que los calcogenuros tenían un rango de resistividad entre $10^{-5} - 10^{-2} \Omega\text{m}$, lo cual es una medida más realista del rango de la resistividad; finalmente las mediciones de efecto Hall confirmaron la polaridad tipo P de CuS con un promedio de la movilidad efectiva de portadores μ_H de $1.94 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ y la polaridad tipo N del CdS con una μ_H de $7.85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Todas las caracterizaciones realizadas a la familia de los semiconductores calcogenuros se utilizaron para mejorar el proceso de diseño y fabricación de dispositivos electrónicos mediante fotolitografía propuesto en [1]. Particularmente, se modificaron las relaciones ancho/largo (W/L) del canal del TFT's para $W/L < 1$, $W/L = 1$ y $W/L > 1$, con L y W variando entre 100 a 12000 μm de longitud. La técnica de depósito HfO_2 como dieléctrico de compuerta fue cambiada a Sputtering dentro del proceso de fotolitografía para ser depositado en la UACJ con relaciones de Oxígeno/Argón (O/Ar) de 0.2, 0.4 y 0.5 de las cuales se obtuvieron constantes dieléctricas 24.34, 17.14 y 19.23 respectivamente para el HfO_2 . Finalmente, se presenta una guía completa del proceso de fabricación de dispositivos electrónicos mediante la técnica de fotolitografía propuesta en [1], en la que se consideran todos los resultados ópticos, de espesor y eléctricos especialmente en la ruta de fabricación propuesta para la UACJ.

Abstract

In the present work, the optical, thickness, and electrical characterization of N-type and P-type chalcogenide semiconductors is presented, aiming to enhance the manufacturing process of electronic devices through photolithography. The semiconductors were deposited using the chemical bath deposition (CBD) technique to achieve P-type semiconductors such as CuS (37°, 30 minutes) and PbS (40°, 14 minutes), and N-type semiconductors such as CdS (43°, 33 minutes). All synthesized semiconductors underwent 1, 2, and 3 deposition baths. Optical studies were conducted using a novel method called *modified Tauc method*, revealing that the bandgap of chalcogenides varies from 2.37 to 2.77 eV for direct band transitions, increasing with thickness. Thin film profile studies were carried out using an innovative technique called optical profilometry, estimating thickness dimensions ranging from 20.34 to 126.81 nm for thin films; semiconductor thicknesses increased with the number of chemical baths. Electrical studies on the synthesized semiconductors using the two-point probe method showed a wide resistivity range for chalcogenides, between $10^{-3} - 10^0 \Omega\text{m}$, as a rough approximation; the four-point probe technique indicated a more realistic resistivity range between $10^{-5} - 10^{-2} \Omega\text{m}$. Finally, Hall effect measurements confirmed the P-type polarity of CuS with an average effective carrier mobility (μ_H) of $1.94 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ and the N-type polarity of CdS with a μ_H of $7.85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

All characterizations of the chalcogenide semiconductor family were utilized to improve the design and manufacturing process of electronic devices through photolithography, as proposed in [1]. Specifically, modifications were made to the width/length (W/L) ratios of TFT channel for $W/L < 1$, $W/L = 1$, and $W/L > 1$, with L and W varying between 100 to 12000 μm in length. The HfO_2 deposition technique as gate dielectric was changed to sputtering within the photolithography process, deposited at UACJ with Oxygen/Argon (O/Ar) ratios of 0.2, 0.4, and 0.5, resulting in dielectric constants of 24.34, 17.14, and 19.23 respectively for HfO_2 . Finally, a comprehensive guide to the electronic device manufacturing process using the proposed photolithography technique in [1] is presented, considering all optical, thickness, and electrical results, especially in the manufacturing path proposed for UACJ.

Bibliografía.

- [1] J. M. Rincón Zuluaga, "Fabricación de un transistor de película delgada tipo p basado en sulfuro de cobre por baño químico."