



Depósito de películas delgadas de óxido de indio dopado con estaño (ITO) para su uso como electrodos en procesos fotoelectroquímicos

D.A. Lucio-Hernández^a, M.R. Alfaro Cruz^{b, c*}, L. M Torres-Martínez^{c, d}

^aUniversidad Tecnológica General Mariano Escobedo, TSU en Nanotecnología, Área Materiales, Libramiento Noreste Km. 33.5, CP, 66050 Cd Gral. Escobedo, N.L., México.

^bCONAHCYT-Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Ecomateriales y Energía, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México.

^cUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Ecomateriales y Energía, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México.

^dCentro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. (CIMAV), Miguel de Cervantes No. 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chih., CP, 31136, México.

* E-mail de autor responsable: malfaroc@uanl.edu.mx

Recibido 15 septiembre 2023, Aceptado 30 septiembre 2023

Resumen

En este trabajo se presenta el depósito de películas delgadas de óxido de indio dopadas con estaño (ITO) utilizando la técnica DC magnetron sputtering para su uso como electrodos en pruebas fotoelectroquímicas. Los depósitos se realizaron variando la potencia de depósito de 10 a 40 W por un tiempo de 30 minutos. Al término del depósito, las películas de ITO fueron tratadas térmicamente a 400°C para incrementar la cristalinidad y las propiedades eléctricas del material, ya que después del tratamiento térmico la resistividad del material fue de 2 MΩ a 20 kΩ. El porcentaje de transmitancia de las películas de ITO fue mayor al 80% cumpliendo así con la transparencia de los óxidos semiconductores transparentes (TCO). Como consecuencia de las diferentes potencias de depósito, el espesor de las películas de ITO se encontró entre los 38 a 49 nm, influenciando las propiedades eléctricas del material. La película ITO - 40W fue la que presentó una mayor concentración de portadores ($2.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$), lo que favoreció el incremento en la fotorespuesta del material en las pruebas de cronoamperometría, alcanzando una fotocorriente de hasta 0.24 A.

Palabras clave: ITO, películas delgadas, propiedades eléctricas, fotoelectrodos.

1. Introducción

El óxido de indio dopado con estaño, mejor conocido como ITO, es uno de los óxidos semiconductores transparentes más utilizados en diversos dispositivos fotoelectrónicos como celdas solares, diodos emisores de luz, electrodos en celdas fotoelectroquímicas, etc., ya que tiene una baja resistividad ($\sim 7 \times 10^{-5} \text{ } \Omega\text{cm}$), es altamente transparente en la región visible y tiene muy buenas propiedades eléctricas¹⁻³. Todas estas propiedades dependen de la técnica que se utiliza para el depósito de las películas de ITO, ya que tanto en métodos químicos o físicos, se pueden variar las condiciones de depósito, modificando así las propiedades finales del material. En la literatura, se ha reportado la obtención de películas delgadas de ITO por diferentes métodos, tales como el método sol gel, *ion beam sputtering* o RF y DC Sputtering⁴⁻⁹. En cuanto a las películas de ITO depositadas por el método sol gel, se han reportado variaciones en el método de síntesis para modificar las propiedades eléctricas del material ya sea dopando el ITO con nanopartículas de Ag o evitando el uso de surfactantes, estabilizadores o agentes complejantes para mejorar la cristalinidad de las películas, obteniendo una concentración de portadores de $3.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ y una resistividad de $4.9 \times 10^{-3} \text{ } \Omega\text{cm}$, respectivamente^{5,8}. El uso

de un flujo de oxígeno y/o argón durante el depósito de las películas de ITO, ha sido reportado principalmente cuando se utilizan métodos físicos como *ion beam sputtering*⁹ o DC magnetron sputtering^{6,7}; ya que el uso de estos gases puede mejorar la estequiometría del material⁹. Sin embargo, también se ha reportado que un incremento en el flujo de oxígeno puede causar un decrecimiento en la concentración de portadores, lo cual es perjudicial para cuando se quiere utilizar al ITO como contacto en dispositivos eléctricos⁶. Asimismo, cuando el ITO es utilizado en otro tipo de aplicaciones, por ejemplo, como electrodo en celdas fotoelectroquímicas, la eficiencia de estos estará limitada a las propiedades eléctricas del ITO comercial. Es por ello por lo que en este trabajo se propone el depósito de películas delgadas de óxido de indio dopado con estaño (ITO) utilizando la técnica DC magnetron sputtering sobre sustratos de vidrio. Durante el depósito las condiciones del equipo, como la potencia de depósito del material, son modificadas, con el propósito de modificar las propiedades eléctricas del material. Las películas de ITO fueron depositadas durante 60 minutos y tratadas térmicamente a una temperatura de 400°C al término del depósito. Los resultados se discuten a continuación.

2. Parte experimental

Las películas delgadas de ITO fueron depositadas utilizando la técnica DC magnetron sputtering sobre sustratos de vidrio y un blanco de ITO con una pureza del 99.999%. Antes del depósito, los sustratos fueron limpiados utilizando baños de ultrasonido con soluciones de acetona, isopropanol y agua desionizada, durante periodos de 10 minutos, cada uno. Al término de este proceso, los sustratos fueron secados con aire y se colocaron dentro de la cámara del equipo. Para comenzar el depósito, la cámara es evacuada, utilizando una bomba turbomolecular, a una presión de vacío de 9.6×10^{-6} Torr, para después ser llenada con un flujo de argón de 15 sccm. Después de introducir el gas, la presión dentro de la cámara cambia a 1.6×10^{-6} mTorr. El material fue depositado durante 30 minutos con una potencia de depósito de 10, 20, 30 y 40 W. Después del depósito las películas fueron tratadas térmicamente a una temperatura de 400°C durante 60 minutos. Para futuras referencias las películas serán nombradas con la siguiente nomenclatura ITO-10W, ITO-20W, ITO-30W e ITO-40W, en donde el número indica la potencia utilizada para cada una de las muestras.

El estudio de las propiedades fisicoquímicas del material se realizó utilizando diferentes técnicas caracterización. La estructura cristalina de las películas de ITO fue analizada con un difractómetro de Rayos-X de la marca PANalytical, con una radiación de 1.54 \AA (Cu Ka) en modo ángulo rasante. El espesor de las películas se midió con el método de reflectancia especular utilizando el equipo Filmetrics F20 ($\lambda = 200 - 1100 \text{ nm}$). Las propiedades ópticas fueron estudiadas con el uso de un espectrofotómetro Cary 5000 UV-VIS-NIR (Agilent Cary Eclipse) y un elipsómetro de ángulo fijo de la marca Horiba, Jobin Yvon UVISEL HR 320. Finalmente, las pruebas fotoelectroquímicas se realizaron con un potenciostato-galvonastato (AUTOLAB PGSTAT302N) y fueron irradiadas con un simulador solar (Oriel Sol1A Class ABB, Newport, Xenon de 450W, intensidad 100 mW/cm^2).

3. Resultados y discusión

La estructura cristalina de las películas delgadas de ITO se muestra en la Figura 1, en donde observamos que la presión de trabajo no tiene una influencia significativa en la fase cristalina de las películas, ya que todas las muestras presentan los picos característicos de la fase cubica de ITO, de acuerdo a la tarjeta de difracción 01-089-4596.

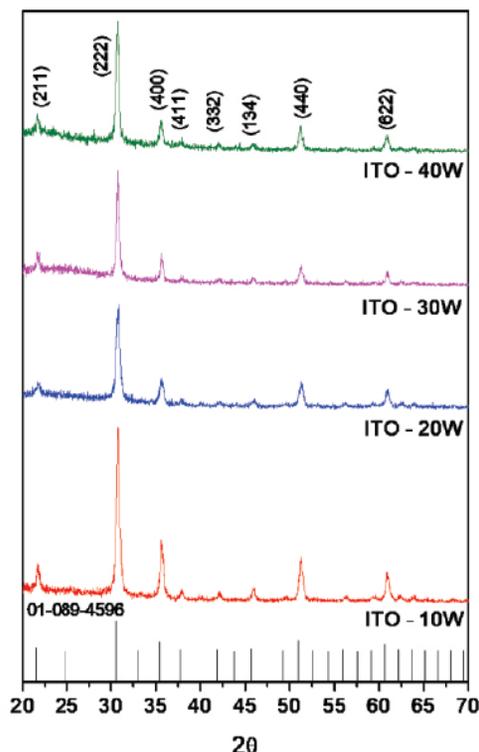


Figura 1. Patrones de difracción de las películas delgadas de ITO variando la potencia de depósito.

En la Tabla 1 se muestran los valores del espaciamento interplanar de los planos principales de las películas de ITO, los cuales, en comparación con los valores de la tarjeta de difracción, tienen un decrecimiento en el plano (211) para las películas depositadas con una potencia de 10, 20 y 30 W, de las cuales, las películas ITO-10W e ITO-20W también tienen una pequeña disminución de este valor en el plano (222).

Tabla 1. Espaciamento interplanar de las películas de ITO.

	Espaciamento interplanar (\AA)			
	(211)	(222)	(400)	(440)
ITO (referencia)	4.1329	2.9224	2.5308	1.7896
ITO-10W	4.0962	2.8996	2.5134	1.7795
ITO-20W	4.0924	2.8987	2.5138	1.7791
ITO-30W	4.0943	2.9005	2.5134	1.7795
ITO-40W	4.1018	2.9051	2.5175	1.7814

Por otro lado, al incrementar la potencia en cada uno de los depósitos, el espesor de las películas fue incrementando desde aproximadamente 38 a 49 nm, tal como se muestra en la Figura 2a. Al incrementar el espesor, también incrementa la deformación en la red, la cual está dada por la siguiente ecuación^{10,11}:

$$\frac{\Delta d}{d_{exp}} = \frac{d_{exp} - d_0}{d_0} \quad (1)$$

donde d_{exp} es el espaciado interplanar de las películas y d_0 es el espaciado interplanar de los datos de la tarjeta de referencia. Si el valor de $\Delta d/d_{exp}$ es < 0 , la película tendrá un esfuerzo de compresión en su estructura, lo cual podría deberse a que hay una oposición entre el sustrato y la película^{10,11}. En la Figura 2b se observa la gráfica que corresponde a los valores de $\Delta d/d_{exp}$ para cada una de las películas, en donde se observa que conforme el espesor incrementa la deformación de la red también incrementa. El In_2O_3 tiene diferentes defectos tales como In intersticial y vacancias de O_2 e In, las cuales pueden ser sustituidas por el Sn dentro de la red In-O. Por lo que, con el incremento en el espesor, es posible que la cantidad de defectos y dislocaciones en la estructura también puede aumentar y por consiguiente la deformación en la red sea mayor. Por otro lado, las vacancias, dislocaciones y defectos en la estructura cristalina provocan que las películas sufran de micro deformación (ϵ), la cual puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (2)$$

donde β es el ancho medio del pico y θ el ángulo de Bragg^{11,12}. Los valores de la micro deformación se presentan en la Figura 2c, los cuales van incrementando conforme incrementa el espesor.

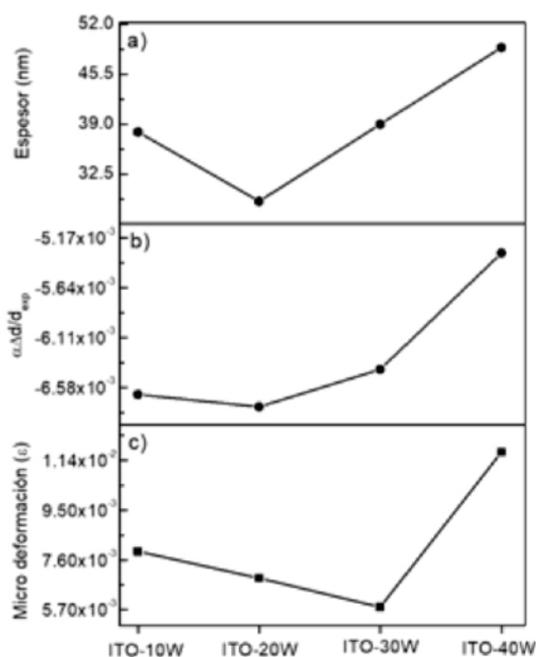


Figura 2. a) Espesor, b) deformación en la red y c) micro deformación de las películas delgadas de ITO.

Por otra parte, la transmitancia óptica de las películas de ITO se muestra en la Figura 3a. Todas las películas tienen un porcentaje de transmitancia por arriba del 80% en la región UV y se va incrementando en la región visible. Un alto porcentaje de transmitancia está relacionado con una mejor cristalización, la cual permite una menor dispersión de la luz en la superficie de la película¹³. Algunos autores, afirman que, si se introduce oxígeno durante el depósito o durante el tratamiento térmico, la estequiometría del ITO mejora incrementando aún más el porcentaje de transmitancia¹⁴. Al incrementar la potencia en el depósito el borde de absorción de las películas se recorre a longitudes de onda mayores, lo que puede dar como resultado un decrecimiento en el valor del band gap del material decrece. Por lo que, el band gap óptico de las películas fue calculado utilizando la siguiente ecuación¹⁵:

$$(ahv) = A(hv - E_g)^2 \quad (3)$$

donde a es el coeficiente de absorción, $h\nu$ es la energía del fotón, E_g es la energía del band gap y A es una constante¹⁵. El valor del band gap de las películas decrece conforme la potencia de depósito incrementa (Figura 3b), esta disminución en el valor del band gap se debe a que cuando un material tiene una alta concentración de impurezas hay una mayor dispersión de la luz, lo cual reduce el valor del band gap¹⁶.

Asimismo, las películas fueron medidas utilizando la técnica de fotoluminiscencia (PL), utilizando una longitud de onda de excitación de 325 nm (Figura 3c). Todas las películas de ITO presentan una emisión en la región ultravioleta (UV), entre los 360 y 420 nm. Dado que esta emisión tiene un ancho considerable, es posible que dentro de ella se pueda encontrar la contribución de otras emisiones, tales como la emisión cercana al borde de absorción (NBE), la cual está asociada a la recombinación de excitones libres a través de los procesos de colisión entre los excitones^{12,17}. Por otro lado, la segunda emisión es generada por la transición de electrones de los niveles donantes a los niveles aceptores, en donde, los niveles aceptores y donadores son formados por las vacancias de oxígeno (V_O) o los iones Sb^{5+} a los niveles aceptores formados por los iones Sb^{3+} ¹⁸. Asimismo, las películas ITO-10W e ITO-30W presentan una pequeña emisión en la región visible, la cual está relacionada a los defectos estructurales en el material, los cuales podrían estar asociados con deficiencias de oxígeno en el In_2O_3 (480 nm), niveles de defectos debidos al dopaje con Sn (494 nm), defectos en la superficie y vacancias de oxígeno (521 nm)^{7,12,19-21}.

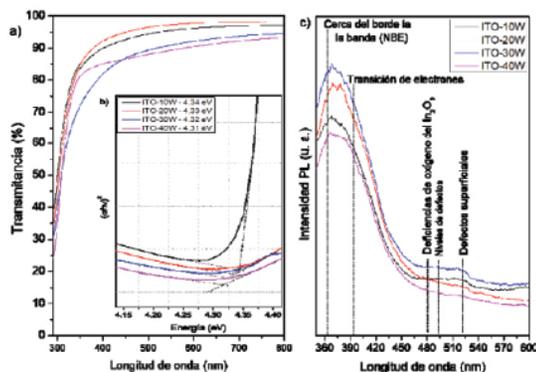


Figura 3. Propiedades ópticas de las películas delgadas de ITO; a) porcentaje de transmitancia, b) grafica de Tauc para el cálculo del band gap y c) espectro de fotoluminiscencia (PL).

Por otro lado, con la técnica de elipsometría fue posible medir las constantes ópticas, el espesor y el band gap del material. Las mediciones se realizaron con un ángulo de incidencia de 70° en un rango de energía de 0.6 a 4.7 eV. La interpretación de los datos se realizó utilizando el software Jobin Yvon DeltaPsi2 (DP2), utilizando un modelo de tres capas aire/TiO₂/vidrio para modelar las propiedades ópticas del material. Los ángulos elipsométricos, Ψ y Δ, determinan el cambio entre la polarización de la luz y la película. Estos ángulos, son calculados por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i\Delta} \quad (4)$$

donde r_p y r_s son los coeficientes de linearidad de la luz polarizada paralela o perpendicular al plano incidente, respectivamente²². Cuando la luz interactúa con la superficie del semiconductor, la reflexión de esta produce cambios en la amplitud (p) y la fase (s) de la luz reflejada. Estos cambios son influenciados por el espesor de la película o por el índice de refracción²². En la Figura 4, se presentan los ángulos elipsométricos Ψ y Δ para cada una de las películas, donde las películas ITO-10W, ITO-30W e ITO-40W tienen el mismo comportamiento para estos ángulos. Sin embargo, los ángulos Ψ y Δ de la película ITO-20W tienen diferente comportamiento, ya que el valor máximo del ángulo Ψ es constante hasta los 4.5 eV (Figura 4b), mientras que los otros ángulos, el valor más alto permanece constante entre 3 y 3.5 eV. Además, el ángulo Δ de la película de ITO-20W decrece hasta los 4 eV, mientras que para las películas ITO-10W, ITO-30W e ITO-40W, el valor mínimo en el ángulo Δ se encuentra entre los 3.2 y 3.8 eV (Figura 4a, b y c).

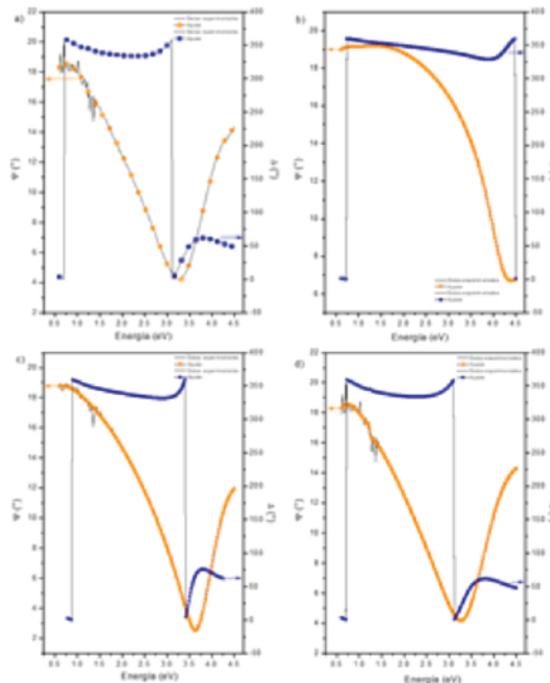


Figura 4. Ángulos elipsométricos Ψ y Δ para las películas a) ITO-10W, b) ITO-20W, c) ITO-30W, e d) ITO-40W.

El índice de refracción (n) y el coeficiente de extinción (k) de las películas de ITO se observa en la Figura 5. A medida que aumenta la longitud de onda, el índice de difracción de las películas decrece. Ya que, en la región entre 290 a 360 nm, las películas de ITO presentan un valor máximo en el índice de refracción entre 2.7 y 2.2 (Figura 5a). En cuanto al valor del coeficiente de extinción, en la región del band gap, alcanza su máximo valor y va decreciendo conforme la longitud de onda incrementa (Figura 5b). Sin embargo, este valor en la película ITO-20W es muy pequeño, lo cual podría atribuirse a la alta transparencia de esta película y al comportamiento que observamos en los valores de los ángulos elipsométricos de la Figura b.

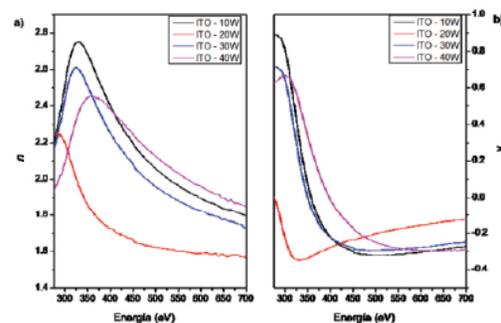


Figura 5. a) Índice de refracción y b) coeficiente de extinción de las películas de ITO obtenidas con diferente potencia de depósito.

En la Tabla 2 se muestran los valores del band gap y del espesor de cada película, obtenidos por elipsometría,

UV-Vis y el método de reflectancia especular. En el caso del espesor de las películas, cuando son medidas por medio de reflectancia especular, los valores en el espesor son mayores que los obtenidos por elipsometría; excepto para la película ITO-20W, la cual tiene un valor de 17 nm por reflectancia y de 29 nm por elipsometría. Las mediciones por reflectancia especular se realizan tomando en cuenta que el ángulo de reflexión de la luz incidente sobre la superficie es igual al ángulo de radiación incidente²³. Sin embargo, si la superficie de la película no es homogénea, el ángulo de reflexión de la luz incidente será diferente del ángulo de radiación incidente. Contrario a esto, las mediciones por elipsometría se basan en el cambio de la polarización de la luz cuando está interactúa con la superficie del material, lo que hace que las mediciones de las propiedades ópticas obtenidas por esta técnica sean más precisas que cualquier otra²². En cuanto a las diferencias en las mediciones del band gap de las películas delgadas, cuando se utiliza la técnica de UV-Vis hay que considerar que hay una pérdida de radiación debido al camino que recorre la luz a través del material, lo cual depende del espesor de este. Esta pérdida de radiación da origen al corrimiento en el borde de absorción (el cual fue explicado anteriormente) en los espectros de transmitancia, lo cual afecta el cálculo en el valor del band gap del material, a diferencia de los valores obtenidos por la técnica de elipsometría.

Tabla 1. Diferencias en las mediciones ópticas de las películas de ITO.

Muestra	UV-Vis	Reflectancia especular	Elipsometría	
	Band gap (eV)	Espesor (nm)	Band gap (eV)	Espesor (nm)
ITO-10W	4.34	45	2.3	38
ITO-20W	4.23	17	3.4	29
ITO-30W	4.24	46	2.5	39
ITO-40W	4.25	40	1.7	49

En cuanto a las propiedades eléctricas de las películas de ITO, se realizaron mediciones de Efecto Hall para conocer la concentración de portadores, la movilidad electrónica y la resistividad eléctrica (Figura 6). Conforme la potencia de depósito incrementa, incrementando el espesor, la concentración de portadores en el material también aumenta de 8.2×10^{21} a $2.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Sin embargo, la película ITO-20W, quien tiene un espesor menor a las demás muestras, es la que presenta una concentración de portadores menor en comparación con las otras películas ($2.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), lo cual confirma

que es el espesor lo que influencia la concentración de portadores (Figura 6). Asimismo, la resistividad y la movilidad de las películas de ITO son proporcionales, ya que, las películas que tienen una mayor movilidad son las que tienen una menor resistividad y viceversa. La película ITO-20W fue quien presento una menor resistividad ($6.9 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$) y una mayor movilidad ($38.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). No obstante, los límites de grano y los defectos en el material influyen de manera significativa la movilidad en el material. Por lo que a pesar de que las películas con mayor espesor también cuentan con una gran cantidad de portadores, la movilidad en estas películas puede disminuir debido a que hay un mayor número de defectos en el material, los cuales, actúan como trampas para los electrones, incrementando la resistividad en el material^{12,24}.

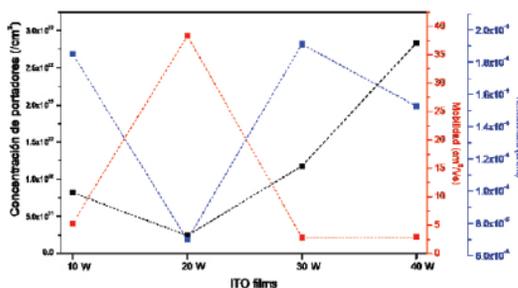


Figura 6. Propiedades eléctricas de las películas de ITO analizadas utilizando efecto Hall.

Finalmente, se realizaron pruebas de cronoamperometría con la finalidad de conocer la fotocorriente generada por cada una de las películas de ITO al ser iluminadas con un simulador solar (Oriel Sol1A Class ABB, Newport, Xenon de 450W, intensidad $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$). Las pruebas se realizaron dentro de una celda electroquímica de tres electrodos; utilizando un contra-electrodo de Pt, un electrodo de referencia de Ag/AgCl 0.5 M KCl, y las películas de ITO como electrodos de trabajo. Mientras que las mediciones de cronoamperometría se midieron a un potencial de 1.23 V vs RHE en un potenciostato-galvanostato (AUTOLAB PGSTAT302N). En la Figura 7a se presentan los resultados de las pruebas de cronoamperometría, en donde observamos que, al iluminar el material, la respuesta de fotocorriente de las películas de ITO aumenta e inmediatamente al quitar la iluminación esta señal disminuye. Ya que, al iluminar las películas de ITO, los portadores de carga migran del electrodo de trabajo al contraelectrodo generando una fotocorriente, en la que los electrones se relajan al estado basal al momento de que la irradiación se suspende. Con estos resultados, podemos tener información sobre los procesos de recombinación de carga que ocurren en las películas de ITO. La película ITO-40W tuvo una mayor fotocorriente en comparación que las demás muestras, debido a que tiene una mayor concentración de portadores seguida por la película ITO-30W, tal como se observa en la Figura 7b.

UV-Vis y el método de reflectancia especular. En el caso del espesor de las películas, cuando son medidas por medio de reflectancia especular, los valores en el espesor son mayores que los obtenidos por elipsometría; excepto para la película ITO-20W, la cual tiene un valor de 17 nm por reflectancia y de 29 nm por elipsometría. Las mediciones por reflectancia especular se realizan tomando en cuenta que el ángulo de reflexión de la luz incidente sobre la superficie es igual al ángulo de radiación incidente²³. Sin embargo, si la superficie de la película no es homogénea, el ángulo de reflexión de la luz incidente será diferente del ángulo de radiación incidente. Contrario a esto, las mediciones por elipsometría se basan en el cambio de la polarización de la luz cuando está interactúa con la superficie del material, lo que hace que las mediciones de las propiedades ópticas obtenidas por esta técnica sean más precisas que cualquier otra²². En cuanto a las diferencias en las mediciones del band gap de las películas delgadas, cuando se utiliza la técnica de UV-Vis hay que considerar que hay una pérdida de radiación debido al camino que recorre la luz a través del material, lo cual depende del espesor de este. Esta pérdida de radiación da origen al corrimiento en el borde de absorción (el cual fue explicado anteriormente) en los espectros de transmitancia, lo cual afecta el cálculo en el valor del band gap del material, a diferencia de los valores obtenidos por la técnica de elipsometría.

Tabla 1. Diferencias en las mediciones ópticas de las películas de ITO.

Muestra	UV-Vis	Reflectancia especular	Elipsometría	
	Band gap (eV)	Espesor (nm)	Band gap (eV)	Espesor (nm)
ITO-10W	4.34	45	2.3	38
ITO-20W	4.23	17	3.4	29
ITO-30W	4.24	46	2.5	39
ITO-40W	4.25	40	1.7	49

En cuanto a las propiedades eléctricas de las películas de ITO, se realizaron mediciones de Efecto Hall para conocer la concentración de portadores, la movilidad electrónica y la resistividad eléctrica (Figura 6). Conforme la potencia de depósito incrementa, incrementando el espesor, la concentración de portadores en el material también aumenta de 8.2×10^{21} a $2.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Sin embargo, la película ITO-20W, quien tiene un espesor menor a las demás muestras, es la que presenta una concentración de portadores menor en comparación con las otras películas ($2.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), lo cual confirma

que es el espesor lo que influencia la concentración de portadores (Figura 6). Asimismo, la resistividad y la movilidad de las películas de ITO son proporcionales, ya que, las películas que tienen una mayor movilidad son las que tienen una menor resistividad y viceversa. La película ITO-20W fue quien presento una menor resistividad ($6.9 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$) y una mayor movilidad ($38.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). No obstante, los límites de grano y los defectos en el material influyen de manera significativa la movilidad en el material. Por lo que a pesar de que las películas con mayor espesor también cuentan con una gran cantidad de portadores, la movilidad en estas películas puede disminuir debido a que hay un mayor número de defectos en el material, los cuales, actúan como trampas para los electrones, incrementando la resistividad en el material^{12,24}.

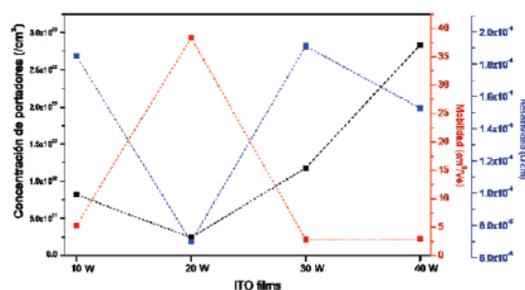


Figura 6. Propiedades eléctricas de las películas de ITO analizadas utilizando efecto Hall.

Finalmente, se realizaron pruebas de cronoamperometría con la finalidad de conocer la fotocorriente generada por cada una de las películas de ITO al ser iluminadas con un simulador solar (Oriol Sol1A Class ABB, Newport, Xenon de 450W, intensidad $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$). Las pruebas se realizaron dentro de una celda electroquímica de tres electrodos; utilizando un contra-electrodo de Pt, un electrodo de referencia de Ag/AgCl 0.5 M KCl, y las películas de ITO como electrodos de trabajo. Mientras que las mediciones de cronoamperometría se midieron a un potencial de 1.23 V vs RHE en un potenciostato-galvanostato (AUTOLAB PGSTAT302N). En la Figura 7a se presentan los resultados de las pruebas de cronoamperometría, en donde observamos que, al iluminar el material, la respuesta de fotocorriente de las películas de ITO aumenta e inmediatamente al quitar la iluminación esta señal disminuye. Ya que, al iluminar las películas de ITO, los portadores de carga migran del electrodo de trabajo al contraelectrodo generando una fotocorriente, en la que los electrones se relajan al estado basal al momento de que la irradiación se suspende. Con estos resultados, podemos tener información sobre los procesos de recombinación de carga que ocurren en las películas de ITO. La película ITO-40W tuvo una mayor fotocorriente en comparación que las demás muestras, debido a que tiene una mayor concentración de portadores seguida por la película ITO-30W, tal como se observa en la Figura 7b.

- Curr. Appl. Phys.* **2020**, *20*, 953–960.
- (3) Yang, S.; Sun, B.; Liu, Y.; Zhu, J.; Song, J.; Hao, Z.; Zeng, X.; Zhao, X.; Shu, Y.; Chen, J.; Yi, J.; He, J. *Ceram. Int.* **2020**, *46*, 6342–6350.
- (4) Kim, S. H.; Cho, W. J., *Micromachines* **2021**, *12*, 1167.
- (5) Misra, M.; Hwang, D. K.; Kim, Y. C.; Myoung, J. M.; Lee, T. H. *Ceram. Int.* **2018**, *44*, 2927–2933.
- (6) Kim, J.; Shrestha, S.; Souri, M.; Connell, J. G.; Park, S.; Seo, A. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 1–8.
- (7) Heo, K. C.; Son, P. K.; Sohn, Y.; Yi, J.; Kwon, J. H.; Gwag, J. S. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **2014**, *601*, 57–63.
- (8) Taha, H.; Jiang, Z. T.; Henry, D. J.; Amri, A.; Yin, C. Y.; Alias, A. B.; Zhao, X., *Mater. Today Commun.* **2018**, *14*, 210–224.
- (9) Lacroix, B.; Paumier, F.; Santos, A. J.; Maudet, F.; Girardeau, T.; Dupeyrat, C.; García, R.; Morales, F. M., *Appl. Surf. Sci.* **2022**, *605*, 154677.
- (10) Rai, R.; Triloki, T.; Singh, B. K., *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **2016**, *122*, 1–11.
- (11) Han, H.; Park, J.; Nam, S. Y.; Kim, K. J.; Choi, G. M.; Parkin, S. S. P.; Jang, H. M.; Irvine, J. T. S., *Nat. Commun.* **2019**, *10* (1), 1–8.
- (12) Thirumoorthi, M.; Thomas Joseph Prakash, J., *J. Asian Ceram. Soc.* **2016**, *4*, 124–132.
- (13) Alsultany, F. H.; Ahmed, N. M.; Matjafri, M. Z. *Soft Nanoscience Letters*, **2014**, *4*, 83–89.
- (14) Meng, L.; Liang, E.; Gao, J., *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **2009**, *9*, 4151–4155.
- (15) Alfaro Cruz, M. R.; Hernandez-Como, N.; Mejia, I.; Ortega-Zarzosa, G.; Martinez-Castañon, G.-A.; Quevedo-Lopez, M. A., *J. Sol-Gel Sci. Technol.* **2016**, *79*, 184–189.
- (16) Jianguo, L.; Fujita, S.; Kawaharamura, T.; Nishinaka, H. *J. Appl. Phys.* **2007**, *101*, 083705.
- (17) Gowthami, V.; Meenakshi, M.; Perumal, P.; Sivakuma, R.; Sanjeeviraja, C., *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2014**, *27*, 1042–1049.
- (18) Babar, A. R.; Shinde, S. S.; Moholkar, A. V.; Bhosale, C. H.; Kim, J. H.; Rajpure, K. Y., *J. Alloys Compd.* **2011**, *509*, 3108–3115.
- (19) Socol, M.; Preda, N.; Rasoga, O.; Costas, A.; Stanculescu, A.; Breazu, C.; Gherendi, F.; Socol, G., *Coatings* **2019**, *9*, 19.
- (20) Cao, Y.; Yang, W.; Zhang, W.; Liu, G.; Yue, P.; Bay, C. W.; Kong, H. I., *New J. Chem.* **2004**, *28*, 218–222.
- (21) Li, B. Y.; Bando, Y.; Golberg, A., *Adv. Mater.* **2003**, *15* (7–8), 581–585.
- (22) Tompkins, H. G.; Irene, E. A. *Handbook of Ellipsometry*; 2005.
- (23) *Ocean Insight*.
<https://www.oceaninsight.com/knowledge-hub/measurement-techniques/reflectance/>.
- (24) Nam, E.; Kang, Y. H.; Son, D. J.; Jung, D.; Hong, S. J.; Kim, Y. S., *Surf. Coatings Technol.* **2010**, *205*, 129–132.
- (25) Alfaro Cruz, M. R.; Ceballos-Sanchez, O.; Luévano-Hipólito, E.; Torres-Martínez, L. M., *Int. J. Hydrogen Energy* **2018**, *43*, 10301–10310.
- (26) Rabell, G. O.; Alfaro Cruz, M. R.; Juárez-Ramírez, I., *Semicond. Process.* **2021**, *134*, 105985.
- (27) Rabell, G. O.; Alfaro Cruz, M. R.; Juárez-Ramírez, I., *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47*, 7770–7782.
- (28) Ortiz Rabell, G.; Alfaro Cruz, M. R.; Juárez-Ramírez, I., *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* **2022**, *433*, 114185.