

## CONSTRUCCIÓN DE FOTOÁNODOS A BASE DE ÓXIDOS METÁLICOS PARA LA FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES EN HIDALGO.

Pérez-Martínez A.<sup>a</sup>, P. A. López-Pérez<sup>a</sup>, J. Márquez-Rodríguez<sup>a</sup>, E. J. Butrón-Vargas<sup>b</sup>, S. M. Ponce-Vargas<sup>c</sup>, M. T. Oropeza-Guzmán<sup>d,e</sup> y M. R. Pérez-García<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Blvd. Acceso a Tolcayuca 1009, Ex. Hda. San Javier, Tolcayuca, Hgo., C.P. 43860, México.

<sup>b</sup> CIDETEQ-Querétaro, Parque Tecnológico Querétaro Sanfandila, Pedro Escobedo, Qro. C.P. 76703, México.

<sup>c</sup> Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Campus Tijuana, Calzad. Universidad 14418, Parque Industrial Internacional Tijuana, Tijuana, B.C., C.P. 22390, México.

<sup>d</sup> Centro de Graduados e Investigación en Química, Instituto Tecnológico de Tijuana Blvd. Industrial s/n, Col. Otay, Tijuana, B.C., C.P. 22500, México.

<sup>e</sup> CIDETEQ-Tijuana, Carr. Tijuana-Tecate Km 26.5, El Florido, Tijuana, B.C., C.P. 22444, México.

[upmh\\_ary@hotmail.com](mailto:upmh_ary@hotmail.com); [paperez@upmh.edu.mx](mailto:paperez@upmh.edu.mx); [jmarquez@upmh.edu.mx](mailto:jmarquez@upmh.edu.mx); [ebutron@cideteq.mx](mailto:ebutron@cideteq.mx);  
[oropeza1@yahoo.com](mailto:oropeza1@yahoo.com); [\\*rperez@upmh.edu.mx](mailto:*rperez@upmh.edu.mx)

### Resumen

México y en especial el estado de Hidalgo enfrentan retos en materia ambiental, donde los costos a la salud y al medio ambiente derivados de la generación y del uso de la energía son significativos, provocando el interés de la comunidad científica y tecnología al aprovechamiento de las energías renovables, como lo es la energía solar. Por ello, en este trabajo se propone la construcción de foto ánodos para su posterior aplicación en la construcción de una celda fotovoltaica para el aprovechamiento de la energía solar y su conversión en energía eléctrica. En relación a ello, se presentan los resultados obtenidos del Depósito Electroforético (DEF) de óxidos metálicos ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  y  $\text{SnO}_2$ ) sobre un electrodo ópticamente transparente de ITO (óxido de indio - óxido estaño) para la formación de películas nanoestructuradas, es decir, la fabricación de foto ánodos que en un trabajo posterior serán utilizados en la construcción de celdas fotovoltaicas. Además se muestran los resultados de potencial zeta y tamaño de partícula de las dispersiones de óxidos metálicos, así como las masas depositadas del DEF.

Palabras clave: *deposito electroforético, películas nanoestructuradas, potencial zeta, foto ánodos, celdas fotovoltaicas*

### Introducción

En busca por lograr la eficiencia energética, han surgido inquietudes y compromisos internacionales justificados en pro del desarrollo e implementación de energías limpias y renovables. En los últimos años, han existido un gran número de tecnologías para la obtención de energía eléctrica a partir del empleo de la radiación solar, aprovechando este recurso renovable, a través de la construcción de celdas fotovoltaicas.

Cabe mencionar que el principio básico de una celda fotovoltaica es la unión de un semiconductor tipo-n con un tipo-p, cuyas propiedades son el exceso de carga electrónica y la presencia de huecos electrónicos, respectivamente, que al ser iluminados por la radiación solar, se genera una diferencia de cargas resultante en el flujo de corriente que va desde el semiconductor tipo-n al tipo-p cuando el sistema está a corto circuito (Fig. 1).<sup>1,2</sup>

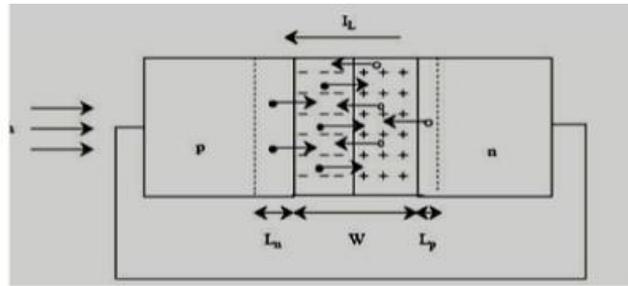


Fig. 1. Esquema del transporte de carga eléctrica a través de la unión n-p en una celda fotovoltaica.

El fundamento de la construcción de una celda fotovoltaica, se basa en la construcción adecuada y eficiente de un foto ánodo, constituido por una película nanoestructurada de óxidos metálicos sobre un ITO, a través de una técnica versátil y económica denominada Depósito Electroforético (DEF)<sup>3</sup>, siendo un método que permite la obtención de depósitos con alta homogeneidad microestructural, favoreciendo así el transporte de carga y con ello, la obtención de altas eficiencias de conversión energía solar a eléctrica.

El Depósito Electroforético (DEF), se lleva a cabo a través del movimiento de partículas cargadas en suspensión hacia el electrodo de carga opuesta bajo la influencia del campo eléctrico (electroforesis), donde las partículas depositadas y colectadas en uno de los electrodos forman una capa relativamente homogénea y compacta (deposición) (Fig. 2).<sup>3,4</sup>

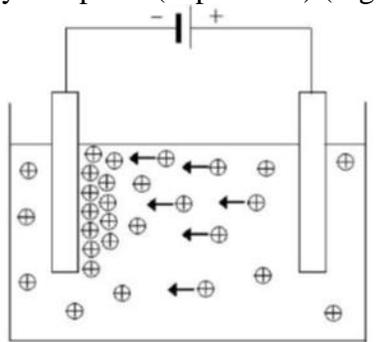


Fig. 2. Celda de dos electrodos para el depósito electroforético, mostrando partículas positivas en suspensión migrando hacia el electrodo de carga opuesta.

Existen dos parámetros importantes que se deben tener en cuenta para lograr la estabilidad de la dispersión, el potencial zeta ( $\zeta$ ) y el tamaño de partícula (TP). Se requieren partículas eléctricamente cargadas que bajo la influencia de un campo eléctrico que puedan moverse y depositarse en el electrodo de carga opuesta, requiriendo valores de potencial zeta positivos o negativos lejanos a cero y tamaños de partícula menores a 30  $\mu\text{m}$ , posterior a la deposición es requerido un paso de sinterizado para obtener la densificación del depósito, eliminar la porosidad y aumentar la estabilidad del material.

En relación a la estabilidad de las dispersiones, el potencial ( $\zeta$ ), es el potencial eléctrico que existe en el plano de corte de una partícula a una distancia corta de la superficie. En una suspensión, las partículas coloidales están cargadas eléctricamente por sus características iónicas y de bipolaridad, generándose una red de carga eléctrica en la superficie de la partícula que puede

afectar la distribución de iones en una región interfacial vecina, provocando un aumento en la concentración de iones de carga opuesta cerca de la superficie. Cada partícula dispersa en una solución se rodea de iones cargados con carga opuesta que se denomina capa fija. Fuera de esta capa fija, existen distintas composiciones de iones de polaridad opuesta, formando un área nebulosa, dando nombre a la llamada doble capa eléctrica en la región de interface partícula-liquido. La doble capa eléctrica está constituida por una región interna que incluyen iones unidos fuertemente a la superficie y una externa, o región de difusión electrostática y movimiento terminal aleatorio (Fig. 3).<sup>5</sup>

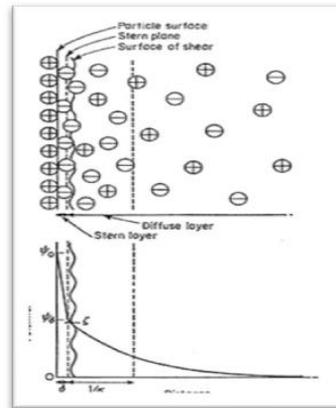


Fig. 3. Doble capa eléctrica y potencial  $\zeta$  .

La medición de potencial  $\zeta$  se realiza aplicando un campo eléctrico controlado por medio de electrodos inmersos en una muestra en suspensión; provocando que las partículas cargadas se muevan a través del electrodo de polaridad opuesta. Donde las fuerzas viscosas que actúan en la partícula en movimiento tienden a oponerse a este movimiento, estableciéndose un equilibrio entre ambas fuerzas de atracción electrostática y la resistencia de la viscosidad.

El potencial  $\zeta$  es una función de la superficie cargada de una partícula, por cualquier capa adsorbida en la interface, dada la naturaleza y composición del medio en el que la partícula se encuentra suspendida. Y está definido por la ecuación de Smoluchowski:

$$\zeta = \frac{v\eta}{\epsilon E} \quad (1)$$

donde:  $\zeta$  es el potencial zeta,  $v$  es la velocidad de la partícula,  $\eta$  es la viscosidad,  $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$  es la permitividad del medio,  $E$  es el campo eléctrico aplicado. Mientras la parte fundamental del potencial  $\zeta$  es la movilidad electroforética, siendo la velocidad de la partícula bajo la influencia de un campo eléctrico en una distancia de electrodos definida y es representada como:

$$U = \frac{v}{E/L} \quad (2)$$

donde:  $U$  es la movilidad electroforética y  $L$  es la distancia de los electrodos.

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo el DEF de las dispersiones de óxidos metálicos y la fabricación de foto ánodos, es importante realizar las mediciones de potencial  $\zeta$  y

tamaño de partícula, así como es importante resaltar que la composición de las dispersiones de óxidos metálicos, está constituida por semiconductores tipo-n, siendo óxidos básicos el  $\text{TiO}_2$  o  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  y un óxido ácido el  $\text{SnO}_2$  como se muestra en la Fig. 4, en donde es evidente observar la posición de estos elementos y su futuro comportamiento en un foto ánodo, teniendo como tendencia principal de los óxidos básicos ceden densidad de carga eléctrica, mientras que los óxidos ácidos tienden a aceptar densidad de carga eléctrica.

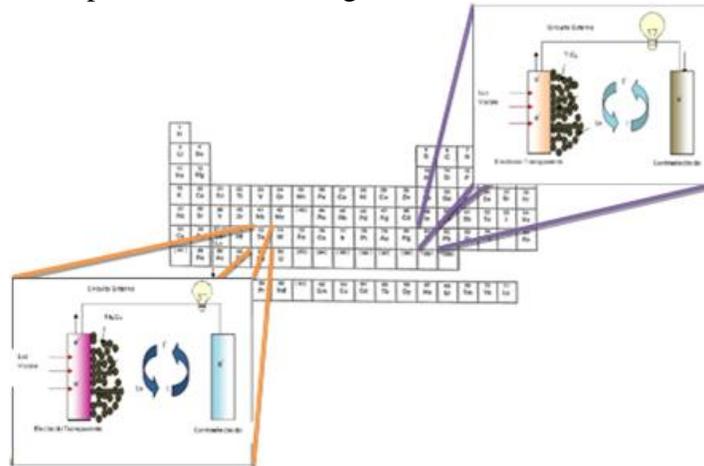


Fig. 4. Ubicación en la tabla periódica de los óxidos metálicos.

## Objetivo

Fabricación de foto ánodos mediante la deposición electroforética de óxidos metálicos sobre un electrodo ópticamente transparente de ITO (óxidos de indio-estaño) para la construcción de celdas fotovoltaicas.

## Metodología

La preparación de las dispersiones se realizó empleando óxidos metálicos de alta pureza ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SnO}_2$ ) marca Alfa-Aesar, CTAB de Merck Millipore, Etanol marca Analytyka<sup>®</sup> 99.5% de pureza, agua destilada marca PiSA<sup>®</sup> e ITO marca Sigma Aldrich de  $30\text{-}60 \ \Omega/\text{cm}^2$  de  $0.081 \text{ cm}^2$ . En la Tabla 1, se muestra la composición de las dispersiones.

El medio utilizado fue  $\text{EtOH}:\text{H}_2\text{O}$ , en una proporción 6.66:93.33, respectivamente. Las dispersiones fueron tratadas con ultrasonido y agitación magnética por un tiempo de 60 y 30 min, respectivamente. Empleando un ultrasonido marca Branson modelo 2210 y un agitador magnético marca Thermo Scientific.

El análisis de las mediciones de potencial  $\zeta$ , tamaño de partícula y movilidad electroforética, se realizó utilizando un Zetasizer Nano-ZS ZEN3500, laser a 532 nm y ángulo a  $173^\circ$ , Malvern Instruments.

Las placas de ITO fueron previamente desengrasadas. Los depósitos electroforéticos se realizaron empleando un fuentes de poder, utilizando como electrodo de trabajo una placa de ITO y como contra electrodo una placa de acero inoxidable en un celda con un volumen de 20 ml aplicando una diferencia de potencial de 4 V por un tiempo de 35 seg. Las placas de ITO fueron

secadas a temperatura ambiente y pesadas antes y después del DEF para determinar la masa depositada.

## Resultados

En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de potencial  $\zeta$ , tamaño de partícula y movilidad electroforética (U).

Del análisis de las mediciones de potencial  $\zeta$ , en general se tienen valores negativos para las dispersiones; sin embargo, dada la naturaleza del sustrato de ITO es recomendable incrementar la carga eléctrica superficial de las partículas a valores positivos de potencial  $\zeta$ , para poder realizar DEF eficientes.

Con respecto a la medición de los valores de potencial  $\zeta$ , se tiene un incremento hacia valores positivos al adicionar SnO<sub>2</sub> (óxido ácido) -15 mV a la dispersión de TiO<sub>2</sub> (óxido básico) -16.46 mV, de igual manera al adicionar CTAB a la dispersión TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> el valor de potencial  $\zeta$  incrementa positivamente obteniendo un valor de 0.771 mV; sin embargo, este valor no es favorable por la inestabilidad de la dispersión ocasionando la precipitación de las partículas, teniendo como consecuencia que el DEF sea poco eficiente. En relación a los resultados presentados, se propone el incrementar de la concentración de SnO<sub>2</sub> y CTAB a la dispersión con la finalidad de obtener valores de potencial  $\zeta$  mayores a 25 mV, para incrementar la carga eléctrica superficial positiva de los óxidos metálicos y obtener DEF catódicos eficientes.

Para las dispersiones de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (óxido básico) -24.10 mV, se tiene que al adicionar SnO<sub>2</sub> (óxido ácido) incrementa en sentido positivo con un valor de potencial  $\zeta$  de -22.90 mV y al adicionar CTAB (surfactante catiónico) nuevamente incrementa en sentido positivo con un valor de potencial  $\zeta$  de 0.06 mV.

Por otro lado, de las mediciones de tamaño de partícula, se obtuvieron valores entre 240 nm y 1771.80 nm. En la literatura, se tiene reportado un valor máximo de tamaño de partícula de 30  $\mu\text{m}$  para obtener un DEF eficiente. Por los valores obtenidos del tamaño de partícula, se espera que los depósitos sean homogéneos, nanoestructurados y compactos. Sin embargo, es necesario realizar la caracterización fisicoquímica de la superficie del foto ánodo por SEM y EDX.

En relación a la movilidad electroforética de los óxidos metálicos las mediciones obtenidas indican que al tener valores mayores positivos (SnO<sub>2</sub> con 0.118  $\mu\text{mcm/Vs}$ ) se espera obtener una velocidad mayor de la partícula de óxido metálico para ser depositada en el electrodo de carga opuesta, mientras que al tener valores de movilidad electroforética negativos (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con -1.89  $\mu\text{mcm/Vs}$ ) el comportamiento se espera sea inverso.

De los resultados obtenidos de la caracterización de la dispersión, se procedió a realizar el DEF de los óxidos metálicos con la composición de las dispersiones reportadas en la Tabla 1. En la Tabla 3, se reportan las masas depositadas de las diferentes dispersiones de óxidos metálicos por DEF. Del análisis de los resultados, se tiene que las masas depositadas para el TiO<sub>2</sub> y Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se considera despreciable ( $1.23 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup>, para ambos óxidos), dichos óxidos al tener los valores más altos de potencial  $\zeta$  en sentido negativo, no resultaron favorables ante el depósito catódico, esto debido a que como se mencionó anteriormente es necesario incrementar la concentración de SnO<sub>2</sub> y/o CTAB, para obtener valores de potencial  $\zeta$  positivos e incrementar los valores de masa depositada, como se observa en las dispersiones TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> y Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SnO<sub>2</sub>

con  $79.01 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$  y  $34.56 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ , respectivamente. Finalmente, al adicionar CTAB a ambas dispersiones, el valor de potencial  $\zeta$  incrementó en sentido positivo, no obstante cercano a cero, creando inestabilidad en la dispersión y provocando la disminución de las masas depositadas.

## Conclusiones

Las mediciones de potencial  $\zeta$  y tamaño de partícula permitieron estudiar la estabilidad de las dispersiones. Así mismo, se pudo estudiar la influencia de cada uno de los óxidos en la dispersión en función de su naturaleza química. Por otro lado, los resultados potencial  $\zeta$ , indican la necesidad de incrementar la carga superficial de las partículas en suspensión, mediante el incremento de la concentración de  $\text{SnO}_2$  y/o CTAB con la finalidad de obtener valores de potencial  $\zeta$  mayores a 25 mV y poder obtener DEF eficientes.

Por otro lado, los valores de tamaño de partícula obtenidos en las dispersiones son favorables para el DEF de películas nanoestructuradas de óxidos metálicos sobre ITO para la fabricación de foto ánodos y su futura aplicación en la construcción de celdas solares.

La caracterización fisicoquímica de la dispersión a través del análisis de las mediciones de potencial  $\zeta$ , TP y movilidad electroforética, son una herramienta útil que permite garantizar la fabricación de foto ánodos mediante DEF para la construcción de celdas solares.

## Referencias

- [1] Corpuz, R.D.; De Juan, L.M.Z.; Mendoza, H.D.; Ordillas, M.U., *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 3, 1-3, 2012.
- [2] Galagan, Y.; Rubingh, J.-E. J.M.; Andriessen, R.; Fan, C.-C.; Blom, P.W.M.; Veenstra, S.C., Kroon, J.M., "Solar Energy Materials & Solar Cells", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 95, 1339-1343, 2011.
- [3] Ilaria Corni, Mary P. Ryan, and Aldo R. Boccaccini "Electrophoretic deposition: From traditional ceramics to nanotechnology", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, 1353-1367, 2008.
- [4] Tetsuo Soga, "Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion", 1<sup>st</sup>. Ed., Elsevier Science, 2007.
- [5] Water Treatment Solution "Potential Z" LENNTECH página en línea científica 1998-2013, consulta por internet el 26 de septiembre del 2013. Dirección de internet: <http://www.lenntech.es/potential-zeta.htm>

Tabla 1. Dispersiones de óxidos metálicos.

Combinación	TiO <sub>2</sub> 0.75 g	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0.75 g	SnO <sub>2</sub> 0.15 g	EtOH 1 mL	H <sub>2</sub> O 14 mL	CTAB 0.006 g
1	x			x	x	
2	x		x	x	x	
3	x		x	x	x	X
4		x		x	x	
5		x	x	x	x	
6		x	x	x	x	X

Tabla 2. Resultados de a) Potencial zeta, b) Tamaño de partícula, c) Movilidad electroforética.

	Dispersiones	a) pZ (mV)	b) TP (nm)	c) U (μmcm/Vs)
1	TiO <sub>2</sub>	-16.46	529.26	-1.29
2	TiO <sub>2</sub> +SnO <sub>2</sub>	-15.00	468.00	-1.17
3	TiO <sub>2</sub> +CTAB+SnO <sub>2</sub>	0.771	642.66	0.034
4	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-24.10	1771.80	-1.89
5	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +SnO <sub>2</sub>	-22.90	248.56	-1.79
6	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +SnO <sub>2</sub> +CTAB	0.06	550.66	0.06

Tabla 3. Resultados de masa depositada por DEF.

	Dispersiones	Masa depositada (mg/cm <sup>2</sup> )	Corriente (V)	Tiempo (seg)
1	TiO <sub>2</sub>	1.23x10 <sup>-3</sup>	4	00:00:35
2	TiO <sub>2</sub> +SnO <sub>2</sub>	79.01x10 <sup>-3</sup>	4	00:00:35

<b>3</b>	TiO <sub>2</sub> +CTAB+SnO <sub>2</sub>	37.03x10 <sup>-3</sup>	4	00:00:35
<b>4</b>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.23x10 <sup>-3</sup>	4	00:00:35
<b>5</b>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +SnO <sub>2</sub>	34.56x10 <sup>-3</sup>	4	00:00:35
<b>6</b>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +SnO <sub>2</sub> +CTAB	7.40x10 <sup>-3</sup>	4	00:00:35

---