



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS CONDUCTORAS
DE ÓXIDO DE ESTAÑO DOPADO CON FLÚOR

(Modalidad: Tesis de Grado)

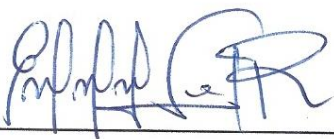
ADRIÁN EDUARDO GÓMEZ BENÍTEZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN QUÍMICA

CUMANÁ, 2018

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS CONDUCTORAS
DE ÓXIDO DE ESTAÑO DOPADO CON FLÚOR

APROBADO POR:



Prof. Euclides Velazco

Asesor



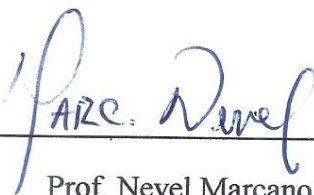
Prof. Francisco A. Pérez

Co-asesor



Prof. José Guilarte

Jurado



Prof. Nevel Marciano

Jurado

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
LISTA DE TABLAS	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTAS DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
Semiconductores	1
Teoría de bandas de energía.....	2
Óxidos conductores transparentes	4
Rocío Pirolitico	5
Películas delgadas	6
Caracterización eléctrica.....	11
La técnica de cuatro puntas o método de Kelvin	11
Figura de merito	12
METODOLOGÍA	14
Dióxido de estaño	14
Dióxido de estaño dopado con flúor	14
Rocío pirolítico	14
Caracterización óptica.....	15
Caracterización eléctrica.....	15
Medida del espesor de las películas delgadas	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
CONCLUSIONES	26
RECOMENDACIONES.....	27
BIBLIOGRAFÍA	28
HOJAS DE METADATOS	31

DEDICATORIA

A mi madre Rosa Gómez, quien con su ejemplo me enseñó que con confianza, paciencia y constancia se pueden alcanzar y lograr los objetivos, gracias por tus esfuerzos y por no decaer en los momentos difíciles que nos ha tocado vivir durante toda mi carrera. Sin tu apoyo habría sido imposible llegar hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor profesor Euclides Velazco y a mi co-asesor profesor Francisco Pérez, por su paciencia para conmigo durante la realización de este trabajo y sobre todo por el apoyo prestado ¡muchas gracias!

A la Universidad de Oriente, por ser la casa que me dio la oportunidad de formarme como profesional y alcanzar esta meta.

A los profesores de la carrera de Licenciatura en Química, gracias.

Por último a todos mis compañeros de clases, que muchos se convirtieron en compañeros de la vida, gracias.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Elementos más utilizados para la preparación de materiales semiconductores...	2
Tabla 2. Propiedades eléctricas de los TCO más comunes.....	5
Tabla 3. Transmitancia (T), resistencia superficial (R_s) y figura de mérito (Φ) para las películas de dióxido de estaño sin dopar a diferentes concentraciones.	18
Tabla 4. Transmitancia (T%), resistencia superficial (R_s) y figura de mérito (Φ) para las películas de dióxido de estaño dopadas con flúor.....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de bandas para los diferentes tipos de materiales.	3
Figura 2. Tipos de semiconductores extrínsecos n y p.	4
Figura 3. Esquema representativo para el índice de refracción.	7
Figura 4. Esquema ley de Beer- Lambert- Bourguer.....	10
Figura 5. Esquema para la técnica de rocío pirolítico.....	15
Figura 6. Espectrómetro UV-visible marca Perkin Elmer modelo Lambda 25.....	15
Figura 7. Esquema de la configuración del método de las 4 puntas.....	16
Figura 8. Analizador de imágenes marca Leco AI32 con cámara acoplada.....	16
Figura 9. Transmitancia vs longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño sin dopar mostradas por triplicado.....	17
Figura 10. Transmitancia vs longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopadas con flúor a diferentes concentraciones.	19
Figura 11. Espesor de las películas vs la concentración del dopante.....	20
Figura 12. Reflectancia vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.	20
Figura 13. Coeficiente de absorción (α) vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.	21
Figura 14. Coeficiente de extinción vs longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopadas con flúor a diferentes concentraciones.	22
Figura 15. Índice de refracción (n) vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.	23
Figura 16. Constante dieléctrica (ϵ_1) vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.	24
Figura 17. Parte imaginaria de la constante dieléctrica (ϵ_2) vs la energía para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.	25

LISTAS DE ABREVIATURAS

FTO: óxido de estaño dopado con flúor (por sus siglas en inglés)

TCO: óxidos conductores transparentes (por sus siglas en inglés)

FDM: figura de mérito

Ω / $\square$: Resistencia por cuadros

D/C: Corriente directa

A/C: Corriente alterna

RESUMEN

En este trabajo de investigación se reporta la síntesis y caracterización de películas delgadas de SnO_2 preparadas por la técnica de Rocío Pirolítico, dopadas a diferentes concentraciones de flúor, para su posible aplicación como óxidos conductores transparentes, los cuales tienen un amplio uso en la industria electrónica, arquitectura y el área de los sensores, entre otras. Las películas fueron caracterizadas mediante las técnicas de espectroscopia UV-Vis y el método Kelvin, o de las cuatro puntas; los espesores se midieron utilizando un analizador de imágenes marca Leco AI32. Las muestras fueron sintetizadas a partir de una solución precursora de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ disuelto en HCl. Se sintetizaron películas con diferentes concentraciones de la solución precursora eligiéndose la concentración que mostró la mayor transmitancia y la menor resistencia por cuadro, la cual correspondió a 2 mol/l. El dopaje de estas muestras se realizó agregando HF a la solución precursora a las concentraciones de 0,1; 0,3; 0,4 y 0,6 mol/l. Los principales resultados muestran que la resistencia por cuadro de las películas intrínsecas disminuyó con la presencia de flúor como dopante. También se observó un incremento en la resistencia de las muestras dopadas al aumentar la concentración de flúor, aumentando también el espesor de las muestras. Este comportamiento afectó la transmitancia de las muestras la cual disminuyó desde valores cercanos al 90% hasta 80% para las muestras de mayor dopaje y mayor espesor. Todas las muestras presentaron transmitancias superiores al 80%. La reflectancia de las muestras fue del orden del 10%. Las constantes ópticas examinadas de las muestras, coeficiente de absorción, constante de extinción o amortiguamiento e índice de refracción, y sus constantes eléctricas correlacionadas, constantes dieléctricas real e imaginaria, fueron estimadas en el rango UV-vis, mostrando un comportamiento tanto cualitativo como cuantitativo acorde con valores reportados en la literatura para películas de SnO_2 dopado con flúor. Las películas que mostraron la mejor prestación óptica-eléctrica, de acuerdo con los criterios establecidos para este trabajo, fueron las dopadas a la concentración de 0,1 mol/l con una transmitancia del 92,45%, una resistencia por cuadro de $(116,7 \pm 0,1) \Omega/\square$, un espesor de $(14,32 \pm 0,02) \text{ nm}$ y una figura de mérito de $3,90 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$.

INTRODUCCIÓN

Sin lugar a dudas, el estudio de las propiedades de los materiales semiconductores y sus sorprendentes aplicaciones en el desarrollo técnico de dispositivos eléctricos, representan una de las revoluciones científico-tecnológicas de mayor impacto sobre nuestra sociedad. Para tener una idea de la real magnitud de esta revolución pensemos por un momento en los transistores, probablemente la aplicación tecnológica más importante de los semiconductores. Cualquier habitante del mundo moderno se encuentra rodeado cotidianamente por millones de transistores. Están en el televisor, en los equipos de música, en la máquina de lavar, en el reloj de pulsera, en el teléfono celular. Un computador personal puede llegar a tener algunos miles de millones de transistores. De hecho, en el mundo existen muchos más transistores que personas [1].

Semiconductores

Los semiconductores son materiales cuya conductividad, debida a cargas de ambos signos, se encuentra en el rango comprendido entre los metales y los aislantes en los cuales la densidad de portadores de carga eléctrica puede ser modificada por medios externos. Hay infinidad de materiales en la naturaleza con este comportamiento, tanto elementos sencillos como compuestos. Las características particulares de los semiconductores pueden explicarse en función de la configuración electrónica de sus átomos [2].

La energía de estos electrones está limitada dentro de unos márgenes que se conocen como bandas de energía. Bajo ciertas excitaciones externas, estos electrones pueden liberarse del átomo al que en promedio corresponden y efectuar mayores recorridos por la red cristalina, quedando el espacio que anteriormente ocupaban temporalmente vacío. A este lugar vacío se le conoce con el nombre de hueco, y puede desde luego ser ocupado por un nuevo electrón, trasladándose este hueco a lo largo del cristal y transportando con él, la carga positiva por la ausencia del electrón que debería ocuparle. Por lo tanto, la ruptura de un enlace produce en realidad dos portadores de carga con signos opuestos: el electrón y el hueco [2].

Los elementos más utilizados para la preparación de semiconductores en la tabla periódica se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos más utilizados para la preparación de materiales semiconductores.

Elemento	Grupo	Electrones en la última capa
Cd	12	2
B, Al, Ga, In	13	3
C, Si, Ge,	14	4
N, P, As, Sb	15	5
S, Se, Te	16	6

Teniendo en cuenta el aspecto energético, el electrón liberado, susceptible de moverse con libertad a lo largo del sólido, posee una energía superior a la de los electrones enlazados y, por tanto, su energía es mayor que la de los huecos. Esta diferencia de energías de los portadores de carga en función de la dirección de propagación en un cristal y de la longitud de onda de la partícula con respecto a la del cristal, da lugar a una teoría conocida como teoría de bandas [2].

Teoría de bandas de energía

En el marco de la teoría de bandas, un semiconductor es un sólido cuyos átomos constituyen una red tridimensional infinita en donde el solapamiento de los orbitales atómicos va más allá de los primeros vecinos, extendiéndose por toda la red; resultando así una configuración de estados localizados muy próximos entre sí, que forman bandas de estados electrónicos permitidos. Entre las bandas hay intervalos de energía en los cuales no hay estados electrónicos “permitidos”; cada uno de estos intervalos es una “banda de energía prohibida (E_g)”. Las bandas que limitan la región de energía prohibida reciben el nombre de banda de valencia (BV), de menor energía, y la banda de conducción (BC), de mayor energía. La banda de energía inferior, banda de valencia, contiene electrones que participan en uniones atómicas, mientras que la superior o de conducción, contiene electrones de mayor energía, involucrados en las corrientes eléctricas. En el caso de los aislantes, la banda de valencia está completa, y la misma tiene una brecha de energía alrededor de 5 eV, la banda prohibida de estos aislantes son mayores a los semiconductores, los cuales tienen una banda de energía prohibida menor (aproximadamente de 1 a 4 eV). Debido a que esta banda es más angosta en los semiconductores, es más fácil para los electrones dar un salto desde la banda de valencia a la de conducción. Por ejemplo, si aumenta la temperatura, los electrones absorben la energía necesaria para saltar a la banda superior. De esta forma aumenta la cantidad de electrones en la banda de conducción y disminuyen en la de valencia, pareciéndose más a un metal. Que haya menos electrones en la banda de valencia también contribuye a

aumentar la conductividad, ya que aumentan los denominados huecos que son considerados como portadores de carga positivos. Las ideas sobre las bandas de energía pueden sintetizarse en forma de un diagrama, para cada uno de los diferentes tipos de materiales, como se puede observar en la figura 1 [2].

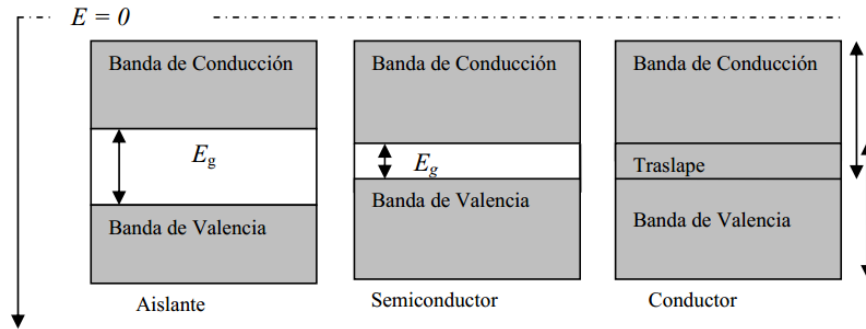


Figura 1. Esquema de bandas para los diferentes tipos de materiales.

La corriente eléctrica en los conductores se debe exclusivamente al movimiento de los electrones libres, mientras que en los semiconductores se debe al movimiento tanto de electrones libres como huecos [3].

Para aumentar la conductividad en un semiconductor, éste se somete a un proceso de “dopado”, el cual consiste en agregar de alguna forma controlada átomos de otro elemento, al que se le conoce como impureza dopante, para de esta manera cambiar las características eléctricas del semiconductor. El propósito del proceso de dopaje es, fundamentalmente, proporcionar al semiconductor una cierta cantidad de portadores de carga, ya sean electrones o huecos según el tipo de impureza, con lo cual la conductividad deberá cambiar (aumenta principalmente). El número de átomos de impurezas en el material es del orden de 1 por cada 10^8 átomos de la red. Además del aumento en la conductividad, también ocurren cambios en sus propiedades ópticas, en especial en la región de la banda prohibida [3].

Un semiconductor puro, mejor conocido como, intrínseco, es aquel en el que el número de electrones y huecos libres son iguales. En ellos la conductividad a temperatura ambiente no es muy alta: la cantidad de portadores de carga libres (electrones y huecos) es muy pequeña. Cuando el semiconductor intrínseco es sometido al proceso de dopaje el número de electrones y huecos ya no es el mismo; a este tipo de semiconductor en donde el número de electrones y huecos es distinto se le llama semiconductores extrínsecos, de los cuales existen dos tipos: tipo n y tipo p. En el semiconductor tipo n, el número de electrones libres excede el número de huecos, mientras que para el tipo p la concentración de huecos es mayor, la conducción en los tipo n se da por movimientos de electrones mientras que en los tipo p, por movimientos de huecos [3].

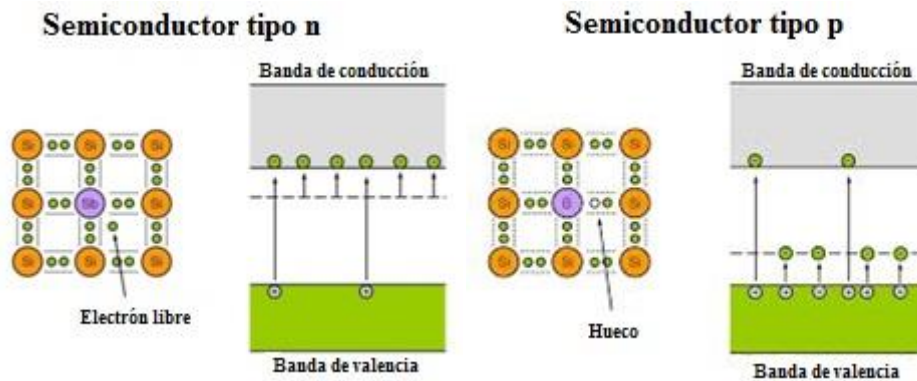


Figura 2. Tipos de semiconductores extrínsecos n y p.

Óxidos conductores transparentes

Los óxidos conductores transparentes (TCO, por sus siglas en inglés), son óxidos metálicos que muestran una buena transparencia óptica y una gran conductividad eléctrica. Generalmente son binarios o ternarios, compuestos por uno o dos metales de transición en la tabla periódica, In, Sn, Zn, Cd [4]. Ocupan un lugar relevante en la sociedad moderna por sus múltiples aplicaciones en productos de consumo diario: televisores de pantalla plana y alta definición (plasma, cristal líquido, o de diodos orgánicos emisores de luz), pantallas táctiles, ventanas inteligentes o de baja emisión térmica de gran uso en arquitectura, ventanas para hornos de microondas y neveras, sensores químicos, electroquímicos y de estado sólido, revestimientos resistentes a la abrasión y a la corrosión, eliminación de escarcha en vidrios de automóviles, aviones y embarcaciones, celdas solares fotovoltaicas de películas delgadas y hasta en la fabricación de transistores en la nascente industria de la electrónica transparente [4,5].

Estos óxidos pertenecen a una clase de materiales única que muestra simultáneamente alta transparencia y alta conductividad. Estas propiedades son antagónicas en la naturaleza: los buenos conductores reflejan la radiación electromagnética en el rango visible (UV-vis) mientras que, los buenos aislantes la dejan pasar, es decir son transparentes. La inusual combinación de transparencia y conductividad sólo se logra para materiales que presentan características muy particulares; brecha de energía mayor que 3 eV, concentración de portadores mayoritarios (electrones o huecos) por encima de 10^{19} cm^{-3} y movilidades mayores que $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. El primer TCO del que se tiene conocimiento es el CdO, descubierto en 1907 por Badeker en forma de película delgada. Desde entonces estos óxidos experimentaron un crecimiento lento en su uso, pero en los últimos diez años su crecimiento ha sido casi explosivo. Los TCO más comunes son los óxidos binarios CdO, In_2O_3 , SnO_2 y ZnO. Todos muestran conductividad tipo-n y satisfacen las características anteriormente citadas, tal como se muestra en la tabla 2 [6].

Tabla 2. Propiedades eléctricas de los TCO más comunes.

Material	Brecha (eV)	Conductividad (S/cm)	Densidad electrónica (cm^{-3})	Movilidad ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	Configuración electrónica del metal
In_2O_3	3,75	10 000	$> 10^{21}$	35	$[\text{Kr}]4d^{10}5s^25p^1$
SnO_2	3,60	5 000	$> 10^{20}$	15	$[\text{Kr}]4d^{10}5s^25p^2$
ZnO	3,35	8 000	$> 10^{21}$	20	$[\text{Ar}]3d^{10}4s^2$
CdO	2,50	2 000	$> 10^{20}$	19	$[\text{Kr}]4d^{10}5s^2$

Un detalle interesante de los TCO es que los metales que los forman: In, Sn, Zn y Cd, tienen una configuración electrónica común, $(n-1)d^{10}ns^2$. Una fuerte interacción entre los subniveles 2p del oxígeno ($\text{O}:1s^22s^22p^4$) y los subniveles ns del metal da lugar a una estructura de bandas cualitativamente similar para todos estos óxidos [6].

El óxido que se sintetizará, para luego ser dopado con flúor, es el dióxido de estaño, el cual es un material semiconductor transparente con gran estabilidad química y mecánica. Tiene una fase estable conocida como casiterita, SnO_2 , y otra denominada romarchita, SnO . Los principales yacimientos del mineral de estaño se encuentran en Brasil, Perú y Bolivia. Al igual que el óxido de cinc, el SnO_2 es un semiconductor con banda prohibida ancha y presenta una adecuada combinación de propiedades químicas, electrónicas y ópticas que lo hacen útil como material para sensores de gas, varistores, dispositivos optoelectrónicos, electrodos electrocatalíticos y celdas fotovoltaicas [7].

El dióxido de estaño dopado con flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$) es uno de los óxidos conductores transparentes, que ha recibido mayor uso industrial, debido a que presenta excelentes propiedades que le permiten ser empleado en la fabricación de dispositivos como: sensores de gas, fotodiodos, contactos transparentes en celdas solares, entre otras aplicaciones [8,9]. El $\text{SnO}_2:\text{F}$ es un semiconductor que presenta una banda óptica de 3,7 a 4,6 eV [10,11].

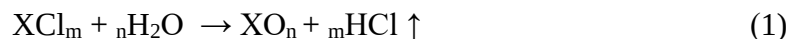
Rocío Pírolítico

La técnica de rocío pirolítico, también llamada en la literatura rocío químico, es una opción interesante en la síntesis de materiales en configuración de películas delgadas, debido al bajo costo de los materiales de partida y también al bajo costo del montaje del equipo para la realización experimental, necesaria para depósitos en áreas relativamente grandes. Ésta se ha usado para depositar películas de óxido de estaño dopado con flúor (FTO, por sus siglas en inglés). En dispositivos electrocrómicos el material activo está en contacto directo con un material que funciona como surtidor de las cargas a ser insertadas en el mismo durante la ocurrencia del fenómeno. En estos dispositivos se requiere por lo general de la presencia de una película conductora como el FTO, depositada sobre un sustrato comúnmente de vidrio y que se usa a su vez como sustrato para el depósito de la película electrocrómica activa. [12].

Durante el proceso de deposición por rocío pirolítico, el precursor es rociado en forma de aerosol hacia el sustrato, los componentes del precursor reaccionan para formar un nuevo compuesto químico en la superficie del sustrato y algunos productos resultantes son liberados al ambiente de trabajo en forma gaseosa.

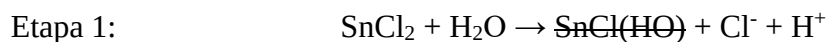
La formación de la capa depende de la evaporación del solvente al momento de que la gota rociada de precursor cae sobre la capa de sustrato. Idealmente todo el solvente se consume o es evaporado y solo permanece el compuesto del precursor sobre el sustrato, permitiendo así una buena composición. [13].

El fenómeno para la preparación de la película delgada de óxido de un metal depende de la hidrólisis superficial del cloruro de metal en una superficie de sustrato calentada de acuerdo con la siguiente ecuación [14].



Donde X es el metal que conforma la película delgada, tales como Sn, In, Zn, etc.

El mecanismo de la reacción para la obtención del SnO₂ será el siguiente:



Películas delgadas

Las películas delgadas suelen definirse como capas sólidas de materiales muy finos, las cuales son creadas por condensación de materia una a una, a partir de átomos o moléculas. Es necesario fijar un límite sobre el grosor de las películas, con el fin de establecer si se consideran delgadas o gruesas. Por ello, como criterio generalizado, se consideran valores menores a un micrómetro para las películas delgadas [15].

En términos generales las películas delgadas se emplean para dos finalidades: la más simple, optimizar alguna o varias de las propiedades de los sustratos a los que recubren e incluso dotarlos de nuevas propiedades. En este caso, las películas delgadas se denominan con el término recubrimientos. La segunda aplicación general es la fabricación de dispositivos con propiedades fisicoquímicas específicas y singulares, que guardan muy poca o ninguna relación con las propiedades iniciales del sustrato y que se comportan en este caso como un soporte físico [16].

Caracterización óptica [17-19]

Cuando la luz pasa de un medio de índice de refracción menor a uno mayor se desvía, acercándose hacia la recta normal a la superficie de separación entre los medios. Como se puede observar en la figura 3.

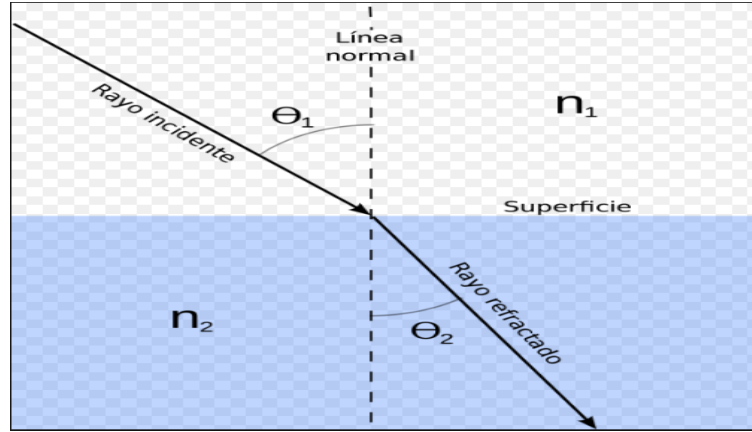


Figura 3. Esquema representativo para el índice de refracción.

Esto sucede debido a que la velocidad y la longitud de onda disminuyen para mantener la frecuencia, y por lo tanto la energía, constante. Este fenómeno recibe el nombre de refracción y se caracteriza mediante un término denominado índice de refracción, el cual se define mediante la expresión,

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

donde c y v son las velocidades de la luz en el vacío y en el medio, respectivamente. El índice de refracción depende de la longitud de onda de la luz incidente, fenómeno conocido como dispersión. La propagación de la luz en un medio se estudia mediante la ecuación de onda la cual, si se desprecian posibles efectos magnéticos, se expresa mediante la ecuación,

$$c^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (4)$$

donde E_x representa el campo eléctrico de una onda polarizada en un plano la cual se propaga en la dirección positiva del eje z y vibra en la dirección del eje x , ϵ la constante dieléctrica, σ la conductividad (a.c.) y ϵ_0 la permitividad en el vacío.

La solución de esta ecuación está dada por,

$$E_x(z, t) = E_o \exp \left[i\omega \left(t - \frac{n}{c} z \right) \right] \quad (5)$$

con E_o como la amplitud del campo eléctrico y ω la frecuencia angular. Si derivamos esta ecuación una vez respecto al tiempo y dos veces respecto al tiempo y a z e introducimos los resultados en la ecuación de onda se obtiene que,

$$\widehat{n^2} = \epsilon - i \frac{\sigma}{\epsilon_o \omega} = \epsilon - \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_o \nu} \quad (6)$$

De este resultado puede verse que el índice de refracción es un número complejo, con una parte real y una imaginaria, la cual puede escribirse de la forma,

$$\hat{n} = n_1 - n_2 = n - ik \quad (7)$$

donde n_2 o k recibe el nombre de constante de amortiguamiento o coeficiente de extinción.

Si se sustituye el valor de $\hat{n}$ en la solución de la ecuación de onda, tendremos,

$$E_x(z, t) = E_o \exp\left(-\frac{\omega k}{c} z\right) \exp\left[i\omega\left(t - \frac{n}{c} z\right)\right] \quad (8)$$

donde E_o por la primera exponencial representa la amplitud modulada (o amortiguada) de la onda y la segunda exponencial la parte no amortiguada.

Elevando al cuadrado la ecuación (7) y comparándola con la ecuación (6),

$$(\hat{n})^2 = n^2 - k^2 - i 2nk = \epsilon - i \frac{\sigma}{\epsilon_o \omega} = \epsilon - \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_o \nu} \quad (9)$$

tendremos que,

$$\epsilon = n^2 + k^2 \quad (10)$$

$$\sigma = nk\nu \quad (11)$$

estas ecuaciones establecen una relación entre las propiedades ópticas (n, k) y eléctricas (ϵ, σ) de los materiales.

Observando con detalle la ecuación 9 se puede ver que el lado derecho representa la diferencia entre dos constantes dieléctricas (de lo contrario no podrían restarse),

$$(\hat{n})^2 = n^2 - k^2 - i 2nk = \hat{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (12)$$

donde,

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (13)$$

$$\epsilon_2 = 2n k = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_o \nu} \quad (14)$$

observe que las ecuaciones 10 y 13 son iguales.

El campo eléctrico asociado a una onda es una cantidad que no es fácil de medir, lo cual no sucede con la intensidad de la onda (relacionada con el campo) la cual puede medirse de manera muy sencilla utilizando algún dispositivo sensible a la luz (p.e. fotodiodos, fototransistores, fotomultiplicadores). Sabiendo que la intensidad de una onda es proporcional al cuadrado del campo eléctrico,

$$I = E^2(z, t) \quad (15)$$

sustituyendo la ecuación 8 en la 15,

$$I = E_o^2 \exp\left(-\frac{2\omega k}{c} z\right) \exp\left[i2\omega\left(t - \frac{n}{c} z\right)\right] \quad (16)$$

que finalmente escribiremos,

$$I = I_o \exp\left(-\frac{2\omega k}{c} z\right) \quad (17)$$

la cual es la intensidad de la onda incidente afectada por el factor de amortiguamiento, responsable de la absorción de la onda en el medio.

Se acostumbra definir una profundidad de penetración característica, d , de una onda como aquella para la cual la intensidad de la onda luminosa que atraviesa el material, disminuye a $1/e$ (37%) de su valor de incidencia I_o ,

$$\frac{I}{I_o} = \frac{1}{e} = e^{-1} \quad (18)$$

comparando con la ecuación 17 y 18 y despejando z e igualándola a d ,

$$z = d = \frac{c}{2\omega k} = \frac{c}{4\pi\nu k} = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (19)$$

el inverso de d recibe el nombre de coeficiente de absorción α ,

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \frac{2\pi\varepsilon_n}{\lambda n} = \frac{\sigma}{nc\varepsilon_o} = \frac{2\omega k}{c} \quad (20)$$

sustituyendo la ecuación 20 en la 17 tendremos,

$$I = I_o \exp(-\alpha d) \quad (21)$$

las unidades de α son cm^{-1} . Esta ecuación es conocida como la ley de Beer-Lambert-Bourguer.

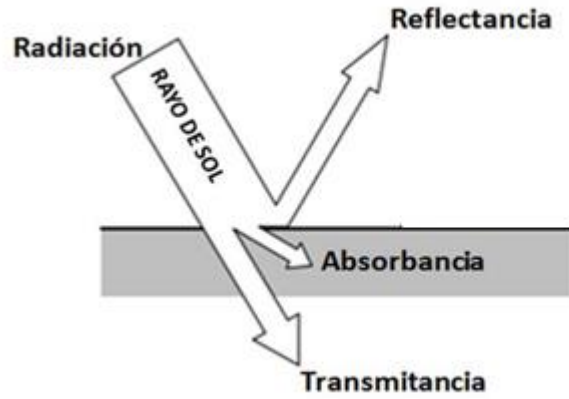


Figura 4. Esquema ley de Beer- Lambert- Bourguer.

La luz que incide sobre la superficie de separación entre dos medios puede ser absorbida, reflejada o transmitida. Se denomina absorbancia, A , (llamada densidad óptica por los físicos) a la expresión,

$$A = -\ln \frac{I_o}{I} = \alpha d \quad (22)$$

representando d el camino recorrido por el haz (en nuestro caso el espesor de la muestra).

Al cociente entre la intensidad de la radiación reflejada, I_R , por la superficie entre la radiación incidente, I_o , se le denomina reflectancia y se expresa,

$$R = \frac{I_R}{I_o} \quad (23)$$

De manera similar, se define el cociente entre la intensidad de la radiación transmitida, I_T , y la incidente, I_o , como la transmitancia y se expresa,

$$T = \frac{I_T}{I_o} \quad (24)$$

Tanto A como R y T son cantidades adimensionales y su suma es igual a uno.

$$A + R + T = 1 \quad (25)$$

Para el caso de los óxidos conductores transparentes, la radiación que incide sobre la película de óxido la atraviesa de manera que el término más importante corresponde a la transmitancia T . Si tenemos una película delgada de espesor d , sobre la cual incide una onda de intensidad I_o , ésta va a experimentar varias modificaciones hasta atravesar la película:

1. I_o intensidad de la onda incidente.
2. RI_o intensidad de la onda reflejada.
3. $(1 - R)I_o$ intensidad de la onda al atravesar la superficie.
4. $(1 - R)e^{-\alpha d}I_o$ intensidad de la onda en el interior de la película al llegar al final de la película.
5. $(1 - R)^2e^{-\alpha d}I_o$ intensidad de la onda transmitida.

Sustituyendo (7) en la ecuación (24),

$$T = \frac{I_T}{I_o} = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (26)$$

y despejando α

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \frac{T}{(1-R)^2} \quad (27)$$

Cuando se tiene incidencia normal del haz de luz sobre la muestra, la reflectancia toma la forma:

$$R = \left| \frac{(\hat{n} - 1)^2}{(\hat{n} + 1)^2} \right| \quad (28)$$

Sustituyendo la ecuación (7) y despejando n tendremos:

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (29)$$

Caracterización eléctrica

La determinación de la resistividad o conductividad de una muestra es de gran utilidad en muchos experimentos y aplicaciones industriales. Uno de los métodos más comunes y útiles para este fin, es la técnica de cuatro puntas o método de kelvin.

La técnica de cuatro puntas o método de Kelvin

Fue desarrollada originalmente por Lord Kelvin, más tarde perfeccionada por Frank Wenner, a comienzos del siglo XX, que la utilizó para medir la resistividad de muestras de tierra. En geofísica se le conoce como método Wenner. También se utiliza ampliamente en la industria de los semiconductores para controlar los procesos de producción.

Para medir una resistencia de valores intermedios (entre algunas decenas de Ohms (Ω) a unos pocos $M\Omega$) tal vez lo más simple es usar la técnica de dos puntas, usando un

multímetro. En general, para medir una resistencia pequeña (menor a unos 10Ω) es necesario tener en cuenta tanto las resistencias de los cables como los potenciales de contacto que pueden estar presentes al unir dos metales distintos. Estos potenciales de contacto son comunes en las uniones de metales diferentes y pueden variar con la temperatura (efecto Seebeck). En parte debido a estos efectos, la resistencia efectiva del sistema puede depender de la polaridad de la fuente, es decir las resistencias no son necesariamente las mismas si la corriente circula en un sentido o en el otro. El método de medición de resistencia que se describe a continuación resuelve algunos de los problemas antes mencionados del método de dos puntas y es particularmente útil para la medición de resistencias de bajo valor.

Cuando se tiene una película delgada cuyo espesor es mucho menor que la distancia entre las puntas ($d \ll s$) el área a través de la cual pasa la corriente va a ser $A = 2 \pi x d$, y la resistencia,

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi x d} = \frac{\rho}{2\pi d} \int_s^{2s} \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi d} \ln 2 \quad (30)$$

siendo d y s el espesor de la película y la distancia entre las puntas, respectivamente. El valor medido de la resistencia de la película delgada será,

$$R = \frac{V}{2I} \quad (31)$$

y su resistividad,

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (32)$$

que como vemos, es independiente de la distancia entre las puntas. La resistencia superficial será:

$$R_s = \frac{\rho}{d} = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (33)$$

cuyas unidades son indicadas como $\Omega/\square$, para diferenciarla de las unidades de R , ecuación 30 [20].

Figura de merito

Por último se calculó la figura de mérito (Φ) la cual es un parámetro empírico que se usa para establecer el buen comportamiento electro-óptico de una película delgada. La figura de mérito (Φ) proporciona una herramienta útil para comparar el rendimiento de los recubrimientos conductores transparentes cuando su resistencia superficial y su

transmisión óptica son conocidas. Comúnmente en todas las aplicaciones de TCOs, la figura de mérito es necesaria para optimizar los parámetros eléctricos y ópticos. Dependiendo del tipo de dispositivo que requiera un electrodo transparente, la transmisión óptica y la conducción eléctrica de los electrodos debe exceder de ciertos valores mínimos. Idealmente ambos parámetros deben ser tan grandes como sea posible, pero su interrelación generalmente excluye el logro simultáneo de estos dos criterios. Esta se determina siguiendo el criterio de Haacke [21]:

$$\Phi = \frac{T^{10}}{R_s} \quad (34)$$

donde T es la transmitancia a una longitud de onda, y la potencia 10 da la máxima figura de mérito. R_s es el valor de la resistencia superficial de la película.

Los materiales semiconductores constituyen la base sobre la cual se soporta la electrónica moderna, hasta un punto tal que se considera su aporte como una verdadera revolución tecnológica. En esta dirección apuntan los óxidos conductores transparentes los cuales exhiben excelentes propiedades ópticas y eléctricas además de poseer un rango muy amplio de aplicaciones. La finalidad de este trabajo fue sintetizar y caracterizar películas delgadas de un óxido conductor, como lo es el óxido de estaño dopado con flúor a través de la técnica del rocío pirolítico.

METODOLOGÍA

Se sintetizaron películas delgadas de dióxido de estaño y películas delgadas de dióxido de estaño dopado con flúor, sobre la superficie de vidrios cubre-objetos de 22×22×0,2 mm, de los utilizados en los microscopios ópticos, mediante la técnica de rocío pirolítico. Posteriormente, se procedió a la caracterización óptica y eléctrica de las películas formadas.

Dióxido de estaño

Para la preparación de este óxido, se pesaron aproximadamente 5 g de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ la cual luego se disolvió en 5 ml de ácido clorhídrico (HCl) concentrado. Se añadió HCl para descomponer las moléculas de polímero que se formaron al diluir con metanol. La solución formada se calentó a 90 °C por 10 minutos. Seguidamente fue enraizada con metanol en un balón aforado de 25 ml. Esta mezcla diluida mediante la adición de metanol sirvió como solución de partida. Siguiendo este mismo procedimiento se prepararon soluciones a las concentraciones de 1,5 y 2,0 mol/l.

Dióxido de estaño dopado con flúor

Para el dopaje de las películas se eligieron las preparadas a la concentración de 2 mol/l. Como dopante se agregó 1 ml de HF de concentraciones 0,1; 0,3; 0,4 y 0,6 mol/l a 3 ml de la solución precursora de dióxido de estaño.

Rocío pirolítico

Las películas de SnO_2 y $\text{SnO}_2\text{:F}$ fueron sintetizadas mediante la técnica de rocío pirolítico, utilizando un Compresor Nebulizador Pulmoneb marca DeVilbiss modelo 3655DX, de los utilizados en las prácticas clínicas. El procedimiento fue el siguiente: Se colocaron los vidrios sobre una cocinilla y se elevó la temperatura gradualmente hasta alcanzar la temperatura de 450 °C, la cual fue medida con una termocupla tipo K. A continuación fueron rociados con la nube de la solución precursora hasta su agotamiento. El volumen de solución fue de 4 ml tanto para las muestras dopadas como no dopadas y la distancia de la boquilla al sustrato fue de 5 cm aproximadamente. En la figura 3 se muestra un esquema del experimento.

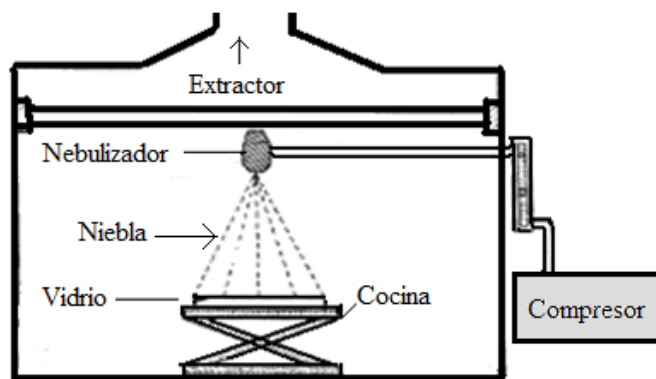


Figura 5. Esquema para la técnica de rocío pirolítico.

Caracterización óptica

Para la caracterización óptica se utilizó un espectrómetro UV-visible marca Perkin Elmer modelo Lambda 25. Las medidas se realizaron para el rango comprendido entre 400 y 900 nm colocando las láminas de vidrio directamente en el porta muestras del espectrómetro.



Figura 6. Espectrómetro UV-visible marca Perkin Elmer modelo Lambda 25.

Caracterización eléctrica

Con el propósito de medir la resistencia superficial (R_s) de las películas se usó el método de las cuatro puntas. La ventaja clave de esta técnica es que elimina la contribución de la resistencia del cableado y de los potenciales de contacto. Este procedimiento es ideal para medir resistencias de valores muy bajos, tiene mucha aplicación en laboratorios y resulta muy adecuada para medir resistividades (resistencias) de muestras de diversas formas o geometrías. Los equipos utilizados para realizar esta caracterización fueron 2 multimedidores Keithley modelo 179A y una fuente de corriente marca HP modelo 6106A. El procedimiento fue el siguiente: debajo del cabezal de cuatro puntas se colocó

la película delgada, mediante la fuente se suministró corriente a través de las puntas de prueba de los extremos $(-I, +I)$ y mediante un voltímetro de alta impedancia (electrómetro) se midió el voltaje entre las 2 puntas internas, seguidamente este valor del voltaje se introduce en la ecuación (33) obteniéndose así el resultado para el R_s de cada película (Figura 6).

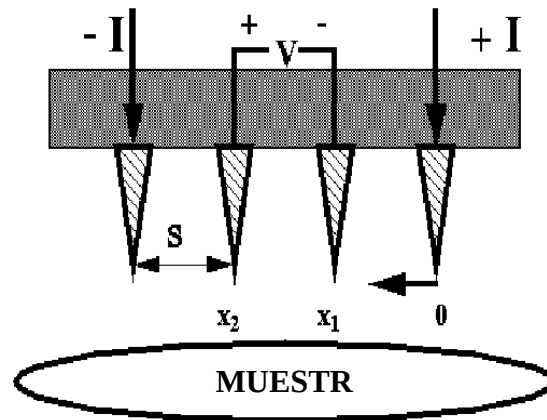


Figura 7. Esquema de la configuración del método de las 4 puntas.

Medida del espesor de las películas delgadas

Para medir el espesor de las películas formadas, se utilizó un analizador de imágenes marca Leco AI32 con cámara acoplada. Se colocaron las películas frente a la lente del analizador hasta obtener una imagen nítida en la pantalla la cual permitió diferenciar de manera muy clara, el espesor de la película (de color fucsia) del espesor del sustrato de vidrio (gris oscuro). El aumento utilizado fue de 200X.

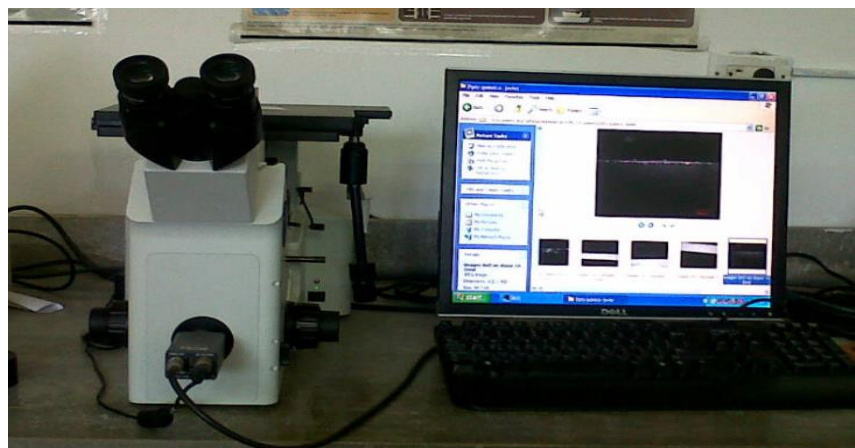


Figura 8. Analizador de imágenes marca Leco AI32 con cámara acoplada

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente trabajo se sintetizaron películas delgadas de dióxido de estaño sin dopar y dopadas con flúor a diferentes concentraciones de la solución precursora, SnCl_2 , con la finalidad de estudiar sus propiedades ópticas y eléctricas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Con la finalidad de establecer un criterio para elegir las películas de SnO_2 que se iban a dopar, se creció un grupo de películas sin dopar a las concentraciones de 1,0; 1,5 y 2,0 mol/l y se determinaron sus propiedades ópticas y eléctricas. En la figura 9 se muestran los espectros de la transmitancia para estas concentraciones, en las cuales se puede observar que la mayor transmitancia corresponde a la concentración de 2 mol/l. Las gráficas se muestran por triplicado. En la tabla 3 se resumen los valores correspondientes a la transmitancia y la resistencia superficial de estas películas.

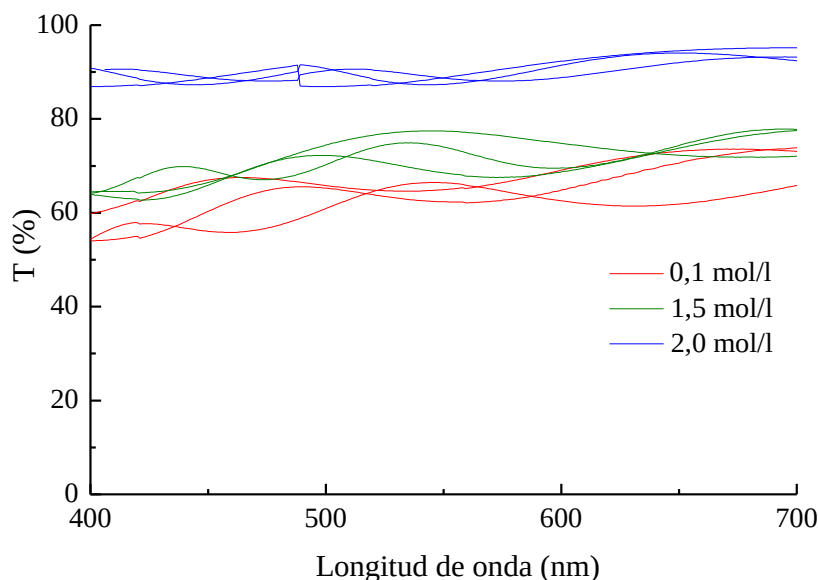


Figura 9. Transmitancia vs longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño sin dopar mostradas por triplicado.

El análisis de estos resultados muestra, de manera muy clara, que los valores promedios correspondientes a la mayor transmitancia (87,09 %) y la menor resistencia superficial ($282,6 \Omega/\square$) están asociados a las películas crecidas a partir de una solución cuya concentración fue de 2 mol/l. Las tablas también muestran el valor de la longitud de onda para el cual la transmitancia alcanzó su máximo valor y la figura de mérito que correlaciona transmitancia y resistividad y cuyo valor también fue mayor para esta concentración.

Tabla 3. Transmitancia (T), resistencia superficial (R_s) y figura de mérito (Φ) para las películas de dióxido de estaño sin dopar a diferentes concentraciones.

Concentración (mol/l)	Longitud de onda (nm)	Transmitancia %	Resistencia superficial ($\Omega/\square$)	Figura de mérito (Ω^{-1})
1,0	722,48	74,14	546,2	$9,19 \times 10^{-5}$
	673,04	73,58	610,4	$7,62 \times 10^{-5}$
	601,98	72,49	760,1	$5,27 \times 10^{-5}$
1,5	724,04	77,90	423,3	$1,94 \times 10^{-4}$
	545,98	77,47	390,6	$1,99 \times 10^{-4}$
	696,03	77,86	416,8	$1,96 \times 10^{-4}$
2,0	599,51	89,32	272,4	$1,19 \times 10^{-3}$
	595,73	85,09	294,3	$6,76 \times 10^{-4}$
	552,35	86,86	281,1	$8,70 \times 10^{-4}$

Una vez elegida la concentración de 2 mol/l para las películas intrínsecas, se procedió a realizar el dopaje a las concentraciones de flúor de 0,1; 0,3; 0,4 y 0,6 mol/l. La figura 10 muestra las curvas de transmitancia para las películas dopadas en función de la longitud de onda utilizando la concentración de flúor como parámetro. Se observa de manera clara como la transparencia de las películas muestra una leve disminución en relación con las muestras sin dopar a medida que aumenta la concentración de flúor. Sin embargo la transmitancia es superior al 80%, de igual forma y como era de esperarse el valor de la FDM a concentración de flúor 0,1 mol/l resultó ser la de mejor calidad, obteniendo el mayor valor de figura de mérito igual a $3,9 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$, tal como se muestra en la tabla 4. En la figura 10 también se pudo observar que para longitudes de ondas mayores que 680 nm se observan oscilaciones en las señales de la transmitancia lo cual está asociado a limitaciones del equipo en estas regiones del espectro. Esto impide obtener parámetros importantes como la brecha de energía a partir de la región UV y la frecuencia de plasma en la región IR.

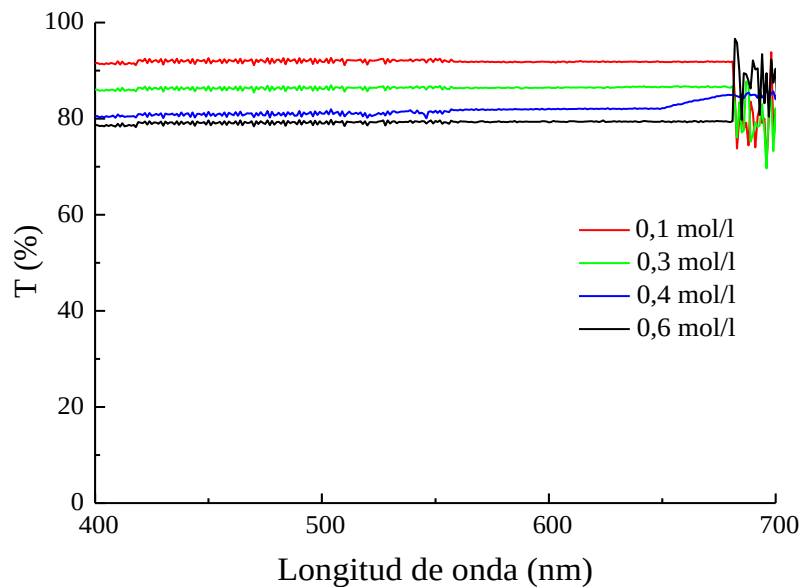


Figura 10. Transmitancia vs longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopadas con flúor a diferentes concentraciones.

Tabla 4. Transmitancia (T%), resistencia superficial (R_s) y figura de mérito (Φ) para las películas de dióxido de estaño dopadas con flúor.

Concentración del dopante (mol/l)	Transmitancia (%)	Longitud de onda (nm)	R_s ($\Omega/\square$)	Figura de mérito Φ (Ω^{-1})
0,1	92,45	529	116,7	$3,90 \times 10^{-3}$
0,3	86,95	504	154,3	$1,60 \times 10^{-3}$
0,4	82,21	650	175,1	$8,05 \times 10^{-4}$
0,6	79,64	548	277,8	$3,69 \times 10^{-4}$

En la figura 11 se muestra el espesor de las películas para las diferentes concentraciones de flúor. Estos valores nos indican que nuestras películas pueden considerarse como delgadas [15]. El espesor de las mismas aumenta al aumentar la concentración del dopante, lo cual da lugar a una mayor absorción y por lo tanto una disminución en la transmitancia como puede observarse en la figura 10. En principio el contenido de flúor no debería influir sobre el espesor de las películas, sin embargo, nuestros resultados reflejan un inusual aumento lo cual se refleja en una disminución de la transmitancia y un correspondiente aumento en la reflectancia, como se muestra en la figura 12. Resultados similares han sido reportados en la literatura los cuales han sido asociados a

la solubilidad del dopante en la solución precursora [22]. Los valores de la reflectancia son complementarios con los de la transmitancia, éstos aumentan al aumentar la concentración.

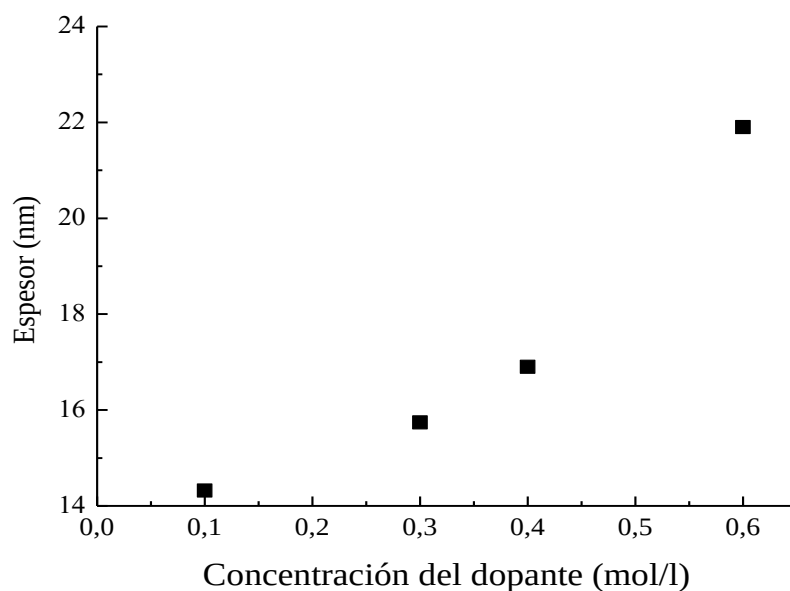


Figura 11. Espesor de las películas vs la concentración del dopante.

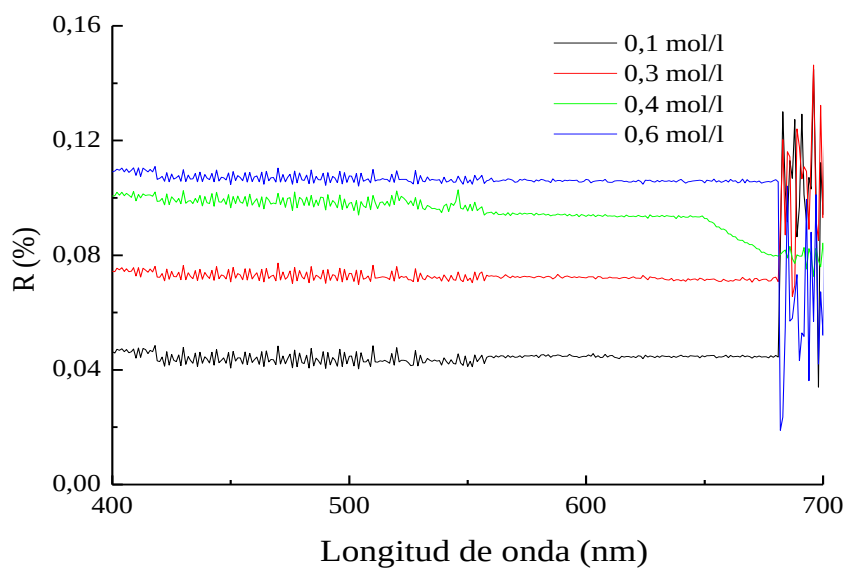


Figura 12. Reflectancia vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.

Conocidas la transmitancia y la reflectancia se procedió a la determinación de las propiedades ópticas de las películas. Haciendo uso de la ecuación 27 y de la data de las figuras 10 y 12 se procedió a determinar el coeficiente de absorción, los resultados se muestran en la figura 13. El coeficiente de absorción depende de la naturaleza del material y la longitud de onda de la radiación incidente. Los semiconductores presentan una banda de absorción intensa en la zona visible e infrarrojo próximo con un comportamiento similar al de los metales. Para longitudes de ondas mayores el comportamiento es similar al de los dieléctricos. Este coeficiente da información sobre la cantidad de energía absorbida por el material [23]. En este caso aumenta al aumentar la concentración del dopante, sin embargo, se mantiene constante para cada concentración en todo el rango UV-vis.

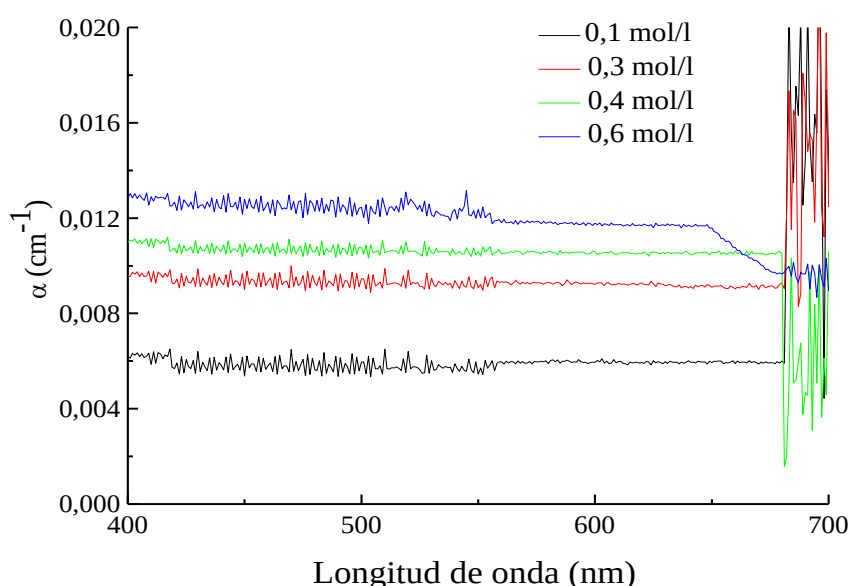


Figura 13. Coeficiente de absorción (α) vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.

Mediante el uso de la ecuación 20 y la data del coeficiente de absorción se determinó la constante de extinción (o de amortiguamiento), la cual nos proporciona información sobre la capacidad de penetración de la señal luminosa incidente en el material. Este resultado se muestra en la figura 14. El valor de k aumenta al aumentar la concentración del dopante indicando una disminución en la transparencia de la muestra (figura 10). También se puede notar que k aumenta al aumentar la longitud de onda, comportamiento observado en estos materiales cuando nos acercamos a la región infrarroja en la cual cualquier señal con una frecuencia cercana a la frecuencia de plasma será reflejada. Los valores mostrados por k están en el rango de valores esperados para semiconductores [24].

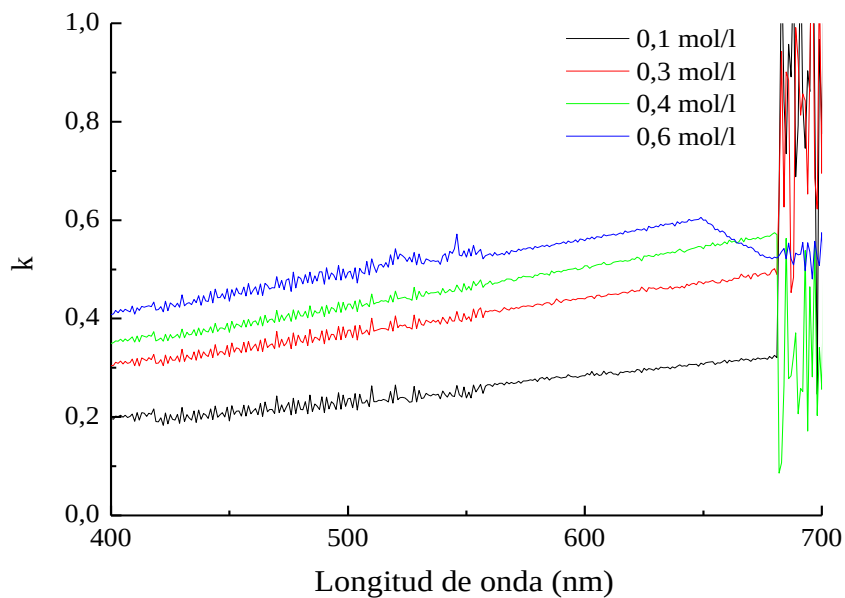


Figura 14. Coeficiente de extinción vs longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopadas con flúor a diferentes concentraciones.

El cálculo del índice de refracción, se realizó usando la ecuación 29 con la data de la reflectancia y el coeficiente de extinción. El índice de refracción de un medio es una medida para saber cuánto se reduce la velocidad de la luz al atravesar dicho medio. La figura 15 muestra la variación del índice de refracción con la longitud de onda. Se puede notar que el índice de refracción aumenta al aumentar la concentración del dopante, hecho explicable debido a que el medio se hace más denso. De igual manera disminuye al aumentar la longitud de onda como era de esperarse, debido a que la velocidad del haz de luz incidente es proporcional a la longitud de onda.

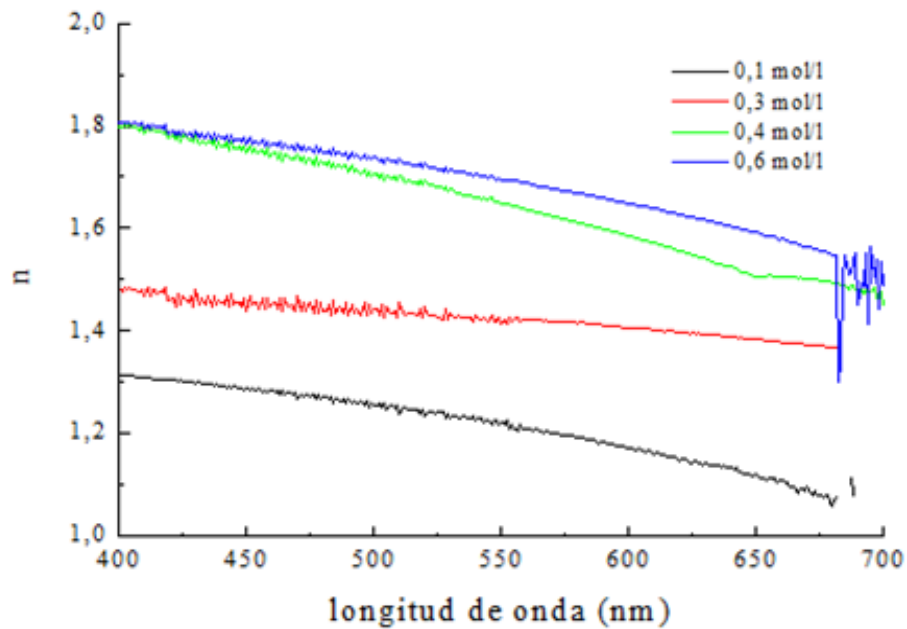


Figura 15. Índice de refracción (n) vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.

Las propiedades ópticas de un material están relacionadas con las propiedades eléctricas a través de la constante dieléctrica, la cual es una cantidad compleja. Esta representa las propiedades macroscópicas de un material dieléctrico y su relación con la permitividad eléctrica del medio. La parte real de la constante dieléctrica figura 16, aporta información sobre el carácter polar del material. Como se observa, ésta crece al aumentar la concentración de flúor y al incrementar la longitud de onda.

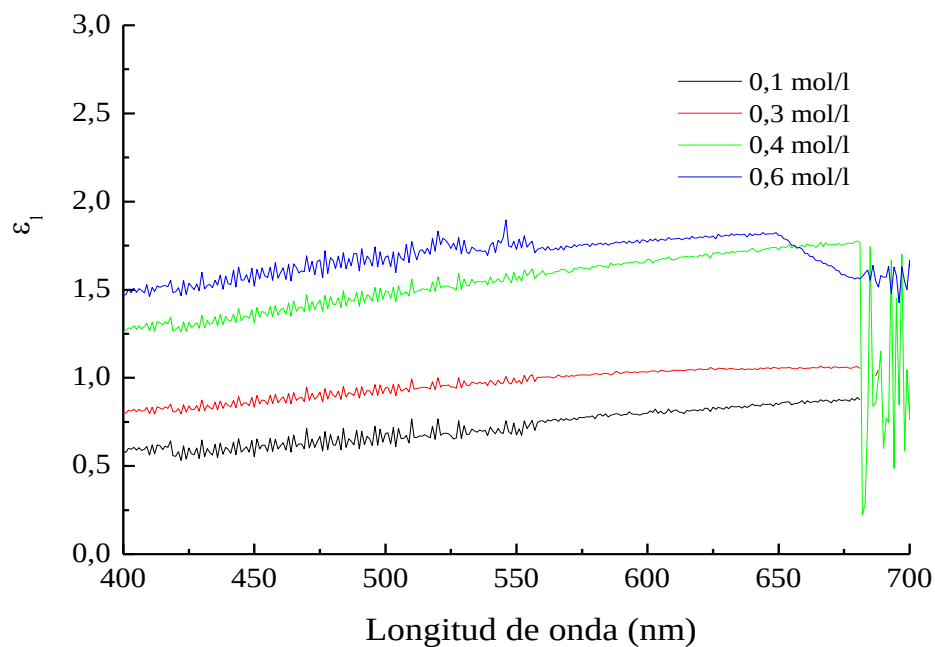


Figura 16. Constante dieléctrica (ϵ_1) vs la longitud de onda para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.

La parte imaginaria de la constante dieléctrica, reflejada en la figura 17, permite apreciar lo que ocurre cuando un material dieléctrico es polarizado para funcionar como un material con cierta conductividad. Para todas las FTO, a medida que la energía incide en los electrones este valor de (ϵ_2) aumento mostrando de esta manera un comportamiento clásico para materiales conductores.

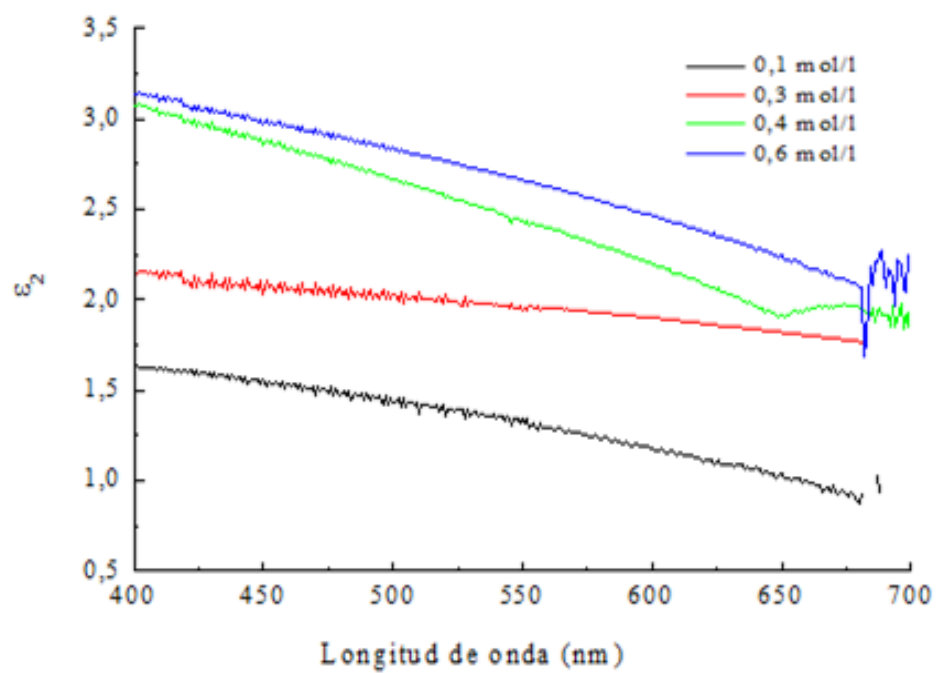


Figura 17. Parte imaginaria de la constante dieléctrica (ϵ_2) vs la energía para las películas delgadas de dióxido de estaño dopada con flúor.

CONCLUSIONES

La técnica de Rocío Pirolítico mostró ser favorable para la obtención de óxidos conductores transparentes debido a su bajo costo, facilidad de realización, y producción de películas delgadas y de muy buenas propiedades opto-eléctricas.

El espesor de las películas en promedio estuvo alrededor de los 17 nm lo cual nos permite asegurar que nuestras películas pueden considerarse delgadas.

Las películas mostraron una transmitancia comprendida entre el 80% y 90%, controlable mediante el dopaje.

Las películas mostraron una resistencia por cuadro comprendida entre $(116,7 \pm 0,1) \Omega/\square$ y $(277,8 \pm 0,1) \Omega/\square$, controlable mediante el dopaje.

Las constantes ópticas de las muestras en el rango a.c., coeficiente de absorción, de extinción e índice de refracción, y las constantes eléctricas correlacionadas, parte real e imaginaria de la constante dieléctrica, fueron estimadas en la región UV-vis, mostrando un comportamiento tanto cualitativo como cuantitativo acorde con valores reportados en la literatura para películas de SnO_2 dopado con flúor.

La FTO realizadas a concentración del dopante de 0,1 mol/l arrojaron el mayor valor de FDM, por ende estas películas podrían ser satisfactoriamente utilizadas como TCO para celdas solares o en aplicaciones optoelectrónicas.

RECOMENDACIONES

Para una caracterización más amplia de las películas de $\text{SnO}_2\text{:F}$, recomendamos ampliar el rango óptico en la región ultravioleta donde debería haber una absorción muy fuerte de la radiación por la película lo cual permitiría determinar la brecha de energía del material, intrínseco, y las brechas ópticas relacionadas con el dopaje de las muestras (Efecto Moss- Burnstein). Por el lado de la región infrarroja se recomienda ampliar el rango de medidas hasta por lo menos el infrarrojo medio, lo cual permite determinar la longitud de onda de plasma, parámetro dependiente del dopaje de las muestras, el cual separa la región transparente de la región reflectora.

BIBLIOGRAFÍA

1. Tarrach, G. y Pinochet, J. 2001. *Los semiconductores y sus aplicaciones*. Trabajo de grado. Facultad de Física. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile. Chile.
2. Sales, D. 2008. *Diseño de la nanoestructura de materiales semiconductores autoensamblados de InAs crecidos mediante epitaxia de haces moleculares*. Tesis doctoral. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica. Universidad de Cádiz, Puerto Real. España.
3. Blancas, S. 2009. *Estudio de la influencia del tratamiento térmico con CdCl_2 en las propiedades ópticas y estructurales de películas semiconductoras de CdTe depositadas por ablación láser*. Trabajo de grado. Escuela Superior de Física y Matemáticas Instituto Politécnico Nacional, México.
4. Robertson J. y Falabretti B. 2010. *Electronic Structure of Transparent Conducting Oxides*, Handbook of Transparent Conductors, S. Ginley D. ,Hosono H. y Paine D. Editors, Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA. 27-50.
5. Wagner, J. F.; Keszler D. A. y Presley R. E. 2008. *Transparent Electronics*, Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA.1-8.
6. Barquinha P., Martins R., Pereira L. y Fortunato E. 2012. *Transparent Oxide Electronics – From Materials to Devices*. Departamento de ciencias dos materiais and CEMOP-UNINOVA, faculdade de ciencia e tecnologia, FCT, Universidade Nova de Lisboa, Portugal. 15-23.
7. Montenegro, A. y Rodríguez, J. 2009. Síntesis óxido de estaño altamente reactivo utilizando como precursor etilhexanoato de estaño. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29(1): 47-52.
8. Fortunato, E.; Ginely, D.; Hosono, H. y Paine, D.C. 2007. Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics. *MRS Bulletin* 2007, 32: 242-247.
9. Oshima, M.; Yoshino, K. 2010. Electron Scattering Mechanism of FTO Films Grown by Spray Pyrolysis Method. *J. Electronic Mater*, 39: 819.
10. Chopra, K.L.; Major S. y Pandya, D.K. 1983. Characterization and Structural Property of Indium Tin Oxide Thin Films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces, and Films*, 102: 1.

11. Shanti, S. Subramanian.; Pamasamy, P. 1999. Investigations on the Optical Properties of Undoped, Fluorine Doped and Antimony Doped Tin Oxide Films. *Crystal Research and Technology*, 8: 1037.
12. Acosta, D. y Ortega, M. 2007. Propiedades estructurales, ópticas y eléctricas de películas delgadas de $\text{SnO}_2\text{:F}$ depositadas por rocío pirolítico pulsado. *Revista Mexicana de Física*, 53(5): 29-34.
13. Kaneko, Kumara, Kawasaki, & Kaneda. (2009). Spray Pyrolysis Deposition for Thin-Film Formation and Its Application to SCD study. Hamamatsu: SPD Laboratory.
14. B. D. Cullity. 1956. Elements of X-ray diffraction. Addison-Wesley Publishing Co, USA.
15. Kozhukharov, S. y Tchaoushev, S. 2013. *Spray pyrolysis equipment for various applications*. Journal of chemical technology and metallurgy, 48(1): 111-118.
16. Nieto, E.; Fernández, J.; Durán, P. y Moure, C. 1994. *Películas delgadas: fabricación y aplicaciones*. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 33(5): 245-258.
17. Pankove, J.J. 1971. *Optical Process in Semiconductors*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, New Yor, USA. 56-75.
18. Piprek, J. 2003. *Semiconductor Optoelectronic Devices*. Introduction to Physics and Simulation, Elsevier Science, University of California at Santa Barbara, California, USA. 56-58.
19. Syenzel, O. 2005. *The Physics of Thin Films Optical Spectra – An Introduction*. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, Germany. 112-115.
20. Hummel, R.E. 2011. *Electronic Properties of Materials*, 4th Ed., Springer, Dordrecht, New York, USA. 33-34.
21. Haacke, G. 1976. New figure of merit for transparent conductors. *Journal of Applied Physics*, 47: 4086.
22. Flores-Carrasco, G. y Alcántara-Iniesta, S. 2014. *Propiedades estructurales, ópticas y eléctricas de películas de SnO_2 y $\text{SnO}_2\text{:F}$ depositadas por rocío pirolítico ultrasónico*. CIDS-ICUAP Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, 27(4): 126-132.

23. Riveros, R.; Romero, E. y Gordillos, G. (2006). Synthesis and characterization of highly transparent and conductive $\text{SnO}_2\text{:F}$ and $\text{In}_2\text{O}_3\text{:Sn}$ thin films deposited by spray pyrolysis. *Brazilian Journal of physics*, 36(3B): 1042-1045.
24. Bach, X.L.; Cuesta, J. y Carles, N. 1998. *Aplicaciones industriales del láser*. Editorial MARCOMBO S.A, Barcelona, España, 19: 22-25.

HOJAS DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/6

Título	SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS CONDUCTORAS DE ÓXIDO DE ESTAÑO DOPADO CON FLÚOR
---------------	--

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Gómez Adrián	CVLAC	18 212 587
	e-mail	adriangovzla@gmail.com

Palabras o frases claves:

Óxido de estaño dopado con flúor, óxidos conductores transparentes, figura de mérito, Resistencia por cuadros, Transmitancia.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/6

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
Escuela de Ciencias	Departamento de Química

Resumen (abstract):

En este trabajo de investigación se reporta la síntesis y caracterización de películas delgadas de SnO_2 preparadas por la técnica de Rocío Pirolítico, dopadas a diferentes concentraciones de flúor, para su posible aplicación como óxidos conductores transparentes, los cuales tienen un amplio uso en la industria electrónica, arquitectura y el área de los sensores, entre otras. Las películas fueron caracterizadas mediante las técnicas de espectroscopia UV-Vis y el método Kelvin, o de las cuatro puntas; los espesores se midieron utilizando un analizador de imágenes marca Leco AI32. Las muestras fueron sintetizadas a partir de una solución precursora de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ disuelto en HCl. Se sintetizaron películas con diferentes concentraciones de la solución precursora eligiéndose la concentración que mostró la mayor transmitancia y la menor resistencia por cuadro, la cual correspondió a 2 mol/l. El dopaje de estas muestras se realizó agregando HF a la solución precursora a las concentraciones de 0,1; 0,3; 0,4 y 0,6 mol/l. Los principales resultados muestran que la resistencia por cuadro de las películas intrínsecas disminuyó con la presencia de flúor como dopante. También se observó un incremento en la resistencia de las muestras dopadas al aumentar la concentración de flúor, aumentando también el espesor de las muestras. Este comportamiento afectó la transmitancia de las muestras la cual disminuyó desde valores cercanos al 90% hasta 80% para las muestras de mayor dopaje y mayor espesor. Todas las muestras presentaron transmitancias superiores al 80%. La reflectancia de las muestras fue del orden del 10%. Las constantes ópticas examinadas de las muestras, coeficiente de absorción, constante de extinción o amortiguamiento e índice de refracción, y sus constantes eléctricas correlacionadas, constantes dieléctricas real e imaginaria, fueron estimadas en el rango UV-vis, mostrando un comportamiento tanto cualitativo como cuantitativo acorde con valores reportados en la literatura para películas de SnO_2 dopado con flúor. Las películas que mostraron la mejor prestación óptica-eléctrica, de acuerdo con los criterios establecidos para este trabajo, fueron las dopadas a la concentración de 0,1 mol/l con una transmitancia del 92,45%, una resistencia por cuadro de $(116,7 \pm 0,1) \Omega/\square$, un espesor de $(14,32 \pm 0,02) \text{ nm}$ y una figura de mérito de $3,90 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail	
Prof. Euclides Velazco	ROL	C ☐ A ☒ T ☐ J ☐ A ☐ S ☐ U ☐ U ☐
	CVLAC	9 975 901
	e-mail	evelazco@udo.edu.ve
Prof. José Guilarte	ROL	C ☐ A ☐ T ☐ J ☒ A ☐ S ☐ U ☐ U ☐
	CVLAC	6 958 125
	e-mail	jjguilartej@hotmail.com
Prof. Nevel Marcano	ROL	C ☐ A ☐ T ☐ J ☒ A ☐ S ☐ U ☐ U ☐
	CVLAC	9 300 769
	e-mail	nevelmarcano@gmail.com

Fecha de discusión y aprobación:

Año	Mes	Día
2018	05	31

Lenguaje: SPA _____

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
Tesis-gómez.doc	Application/word

Título o Grado asociado con el trabajo: Licenciado en Química

Nivel Asociado con el Trabajo: Licenciado

Área de Estudio: Química

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado: Universidad de Oriente

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

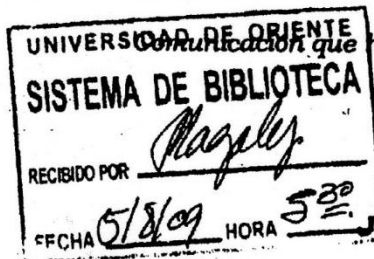
Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI – 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.



Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

JUAN A. BOLANOS CUNEL
Secretario

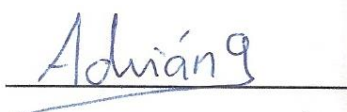


C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

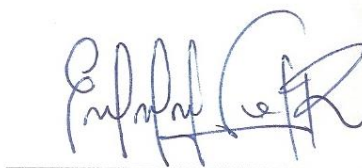
JABC/YGC/maruja

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso- 6/6

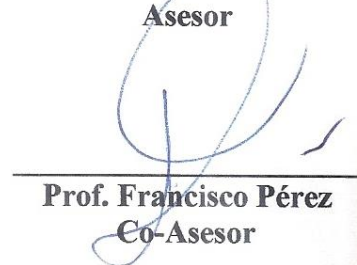
Artículo 41 del REGLAMENTO DE TRABAJO DE PREGRADO (vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009) : “los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario para su autorización”.



Adrián Gómez
Autor



Prof. Euclides Velazco
Asesor



Prof. Francisco Pérez
Co-Asesor