

Sistema mecánico para generación de películas delgadas de semiconductores por medio de rocío pirolítico

Mechanical system for the generation of thin semiconductor films by pyrolytic spray

Erick del Jesús Tamayo-Loeza^{1*}, Ramón Salvador Mézquita-Martínez¹, Iván de Jesús May-Cen¹ y Irving Metelin-Rosado¹

¹*Tecnológico Nacional de México campus Progreso, Boulevard Tecnológico de Progreso S/N x 62, CP 97320, Progreso, Yucatán, México.*

**Corresponding author:
erick.tl@progreso.tecnm.mx*

Resumen. El artículo presenta el método para la generación de películas delgadas de semiconductores, así como el diseño y construcción en su parte mecánica de un dispositivo de spray pirolisis para la producción de películas semiconductoras. El dispositivo está realizado para ser más asequible y accesible que los dispositivos comerciales disponibles actualmente. El dispositivo consta de una base calefactora, un eje central, dos bases, cinco soportes y un motor. La base calefactora está hecha de resistencias tipo cartucho y puede alcanzar temperaturas de hasta 500 °C. El eje central permite que el dispositivo gire de forma continua. Las dos bases soportan las chumaceras y otros componentes del dispositivo. Los cinco soportes sostienen el dispositivo. El motor hace girar el eje central

Palabras clave: pirólisis, semiconductores, slip ring, mecanismo, calefacción.

Abstract. The article presents the design and construction of a spray pyrolysis device for the production of semiconductor films. The device is designed to be more affordable and accessible than commercially available devices. The device consists of a heating base, a central axis, two bases, five supports, and a motor. The heating base is made of cartridge resistors and can reach temperatures of up to 500 °C.

The central axis allows the device to rotate continuously. The two bases support the bearings and other components of the device. The five supports hold the device. The motor rotates the central axis.

Keywords: pyrolysis, semiconductors, slip ring, mechanism, heating.

I. INTRODUCCIÓN

En el método de spray pyrolysis en un reactor tubular, se dispersa una solución precursora en un reactor con paredes calientes, es decir, un horno tubular. Las gotas de aerosol experimentan una serie de procesos que incluyen evaporación, concentración del soluto dentro de la gota, secado, termólisis de las partículas precipitadas y, finalmente sintetizarían para formar partículas compactas.

Estas partículas se generan dentro de cada gota a través del proceso de precipitación. Este sistema permite la producción de nanotubos de carbón y películas de óxidos metálicos. (Chiñas Castillo & Medina, 2018). Por lo que el precio de estos sistemas suele ser impráctico debido a su alto coste (25.000,00 dólares) lo que al ser parte de la producción de la capa captadora de radiación de los paneles solares, estos resultan siendo inaccesibles no solo por el instrumento con el cual se fabrica sino también por los materiales que conlleva como el silicio material escaso y por ende costoso, por lo que en esta investigación se propone indagar a fondo métodos de optimización del

proceso aplicando diversos tipos de sistemas que suplan a otros más complejos, así como materiales que trabajen en similitud con los que ya se encuentran en el proceso estándar de fabricación de paneles, haciéndolos igual o superiormente eficientes, no solo abaratando lo paneles si no también ampliando el campo para su construcción. (Wang, 2016).

Este estudio tiene como objetivo el ensamble de un dispositivo de calentamiento rotativo que cumpla especificaciones técnicas primordiales basadas en productos similares de producción mayor y de alto costo en términos de efectividad y calidad, tales como el control de la temperatura, movimiento, rocío del semiconductor y cobertura, abaratando de forma parcial el costo de fabricación de paneles solares favoreciendo a la competencia de comercio mediante piezas y sistemas de fácil adquisición.

Los dispositivos utilizados para este medio como anteriormente fue mencionado, no solo representan una inversión la cual está fuera de los márgenes de muchos si no también cuentan con sistemas avanzados que provocan que el precio regular de un equipo dentro del promedio llegue a costar 25.000,00-26.000,00 dólares por unidad (Wang, 2016), por lo que los reactores más utilizados en la técnica de spray pirólisis principalmente, están diferenciados por la forma en la que están instalados.

Otra de las características importantes que se muestran en los reactores es el uso del nebulizador, ya sea de compresor simple o ultrasónico, así como el uso de aspersores neumáticos para la deposición del material sobre el sustrato. Se muestra un diagrama de una típica instalación de un reactor para depositar películas delgadas sobre un sustrato.

Por lo que en el dispositivo se decidió utilizar la forma vertical de arriba hacia abajo debido a que en las líneas de producción de losetas cerámicas es más sencillo el uso de un reactor de este tipo ya que en estas líneas el material se transporta con bandas de manera horizontal, lo que nos proporciona la facilidad de instalación y de deposición. (Ruiz, L. R., & Cano, J. C. 2012). En la figura 1, se muestra el diagrama de instalación básica de rocío pirolítico.

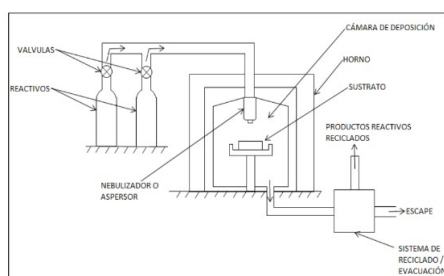


Figura 1. Diagrama de instalación básica de rocío pirolítico. Fuente: Elaboración propia.

El cambio climático y la contaminación del medio ambiente ha logrado que exista una gran preocupación con la producción de energía eléctrica, por lo que se han buscado otras alternativas que sean eficientes y amigables con el medio ambiente. Hoy en día existen diversos tipos de energías renovables, entre las cuales una de las más utilizadas es la energía fotovoltaica. Esta ha demostrado ser altamente eficaz y se adapta a los consumos energéticos que genera todo tipo de establecimiento o empresa. Para la producción de energía eléctrica los paneles solares funcionan gracias a las celdas fotovoltaicas y con los materiales que integra su fabricación, siendo el silicio el material semiconductor utilizado con más frecuencia debido a su rendimiento y conductividad, el cual permite absorber la luz del sol y transformarla en energía por un efecto fotovoltaico. (Solarplak, 2023). Sin embargo, el silicio es un material que se encuentra de forma reducida en el ambiente por lo que también existen vertientes capaces de sustituir de manera parcial este material aportando características iguales o similares, pero que al ser más abundantes permiten hacer de su proceso más accesible, tomando en cuenta la conductividad y producción que se podría obtener. Para ello se hacen pruebas con rocío pirolítico en donde los materiales que son más utilizados son aquellos que dan como resultado la disposición óxidos de algún metal. (Luis Ruiz, 2012).

Para la técnica de spray que se utiliza, se requiere de algunos tipos de reactores en rocío pirolítico están diferenciados por la forma en la que están instalados, pueden ser horizontales, verticales de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo y diagonales. Otra característica que hay que tener en cuenta es el uso del nebulizador y de los aspersores neumáticos, los cuales permiten el depósito del semiconductor en las muestras de películas delgadas. (Luis Ruiz, 2012).

II. METODOLOGÍA

Para la determinación del modelo de spray pirólisis se realizó las pruebas de laboratorio utilizando equipos del mismo, ya obtenida la técnica se hace la prueba en una plancha de calentamiento de laboratorio, este sistema térmico está compuesto por una placa calefactora de laboratorio de la marca StableTemp Digital Hotplates, and Stirring Hotplates, modelo 03407-01. Cuenta con un voltaje de funcionamiento de 120 V y una temperatura máxima de 500 °C, el cual tiene como función primordial llevar a cabo el proceso de calentamiento de los sustratos y agitación de la solución precursora con un motor de hasta 1500 RPM. En la Figura 2, se muestra el modelo de cama calefactora de laboratorio utilizada.



Figura 2. StableTemp modelo 03407-01. Fuente: Elaboración propia.

Para el monitor de la temperatura se cuenta con una cámara infrarroja con rango de temperatura ampliado modelo FLIR E6-XT, el cual sensa la temperatura real de los sustratos, este sensor tiene un rango de temperatura de $-20^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. En la Figura 3 se muestra la cámara infrarroja utilizada para el experimento.



Figura 3. Cámara infrarroja FLIR E6-XT. Fuente: Elaboración propia.

La obtención de las películas delgadas de sulfuro de zinc (ZnS) se realizó mediante el método de spray pirólisis, utilizando una solución precursora con una concentración de 0.025M. Se preparó la solución y se homogenizó mediante agitación magnética continua. Posteriormente, se vertió la solución en un sistema de nebulización y se colocaron los sustratos de vidrio tipo Corning dentro de una cámara térmica.

Una vez en la placa calefactora, se elevó la temperatura del sustrato hasta alcanzar los 500°C , temperatura necesaria para favorecer la descomposición térmica del precursor y la formación del compuesto ZnS. Al llegar a esta temperatura, se inició el proceso de nebulización intermitente, rociando la solución sobre la superficie caliente mediante un sistema de spray controlado. Este procedimiento permitió la formación progresiva de las películas delgadas sobre los sustratos, gracias a la reacción pirolítica inducida por el calor.

Finalizado el proceso de deposición, los sustratos fueron retirados cuidadosamente y se dejaron enfriar a temperatura ambiente de manera controlada, con el fin de evitar posibles tensiones térmicas que pudieran afectar la calidad de las películas. Una vez completada la etapa de fabricación, las muestras fueron caracterizadas ópticamente mediante espectroscopia. Además, se aplicó el método de Tauc para determinar la energía de banda prohibida (Eg), utilizando la gráfica de $(\alpha h\nu)^2$ en función de la energía del fotón. Los resultados obtenidos de estos estudios se presentan en las figuras correspondientes e la siguiente sección.

III. RESULTADOS

Se realizaron estudios de caracterización óptica en películas delgadas de sulfuro de zinc (ZnS) depositadas sobre sustratos de vidrio tipo Corning, empleando una solución precursora con una concentración de 0.025 M. El objetivo fue analizar la transmitancia óptica en el rango UV-Vis-NIR y determinar la energía de banda prohibida (band gap) del material. A continuación, en las Figuras 4 y 5, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos de los estudios.

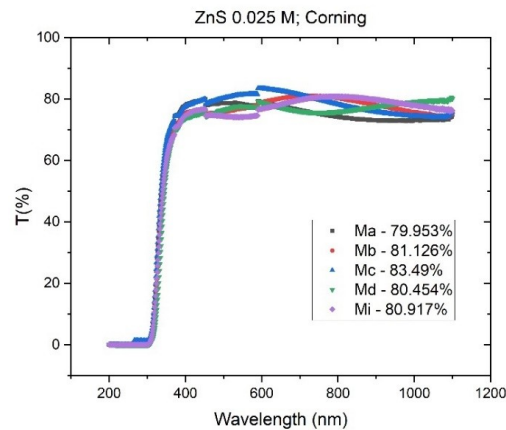


Figura 4. Gráfica de Transmitancia Espectral ($T\%$) vs Longitud de Onda (nm). Fuente: Elaboración propia.

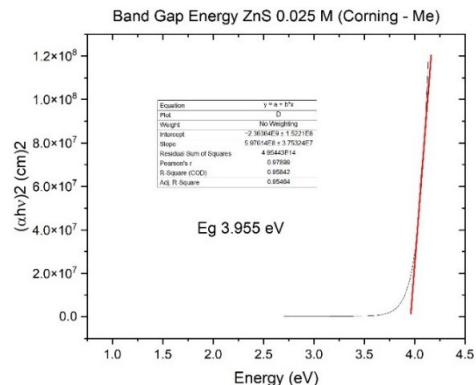


Figura 5. Gráfica de Tauc. Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron estudios de caracterización óptica en películas delgadas de sulfuro de zinc (ZnS) depositadas sobre sustratos de vidrio tipo Corning, empleando una solución precursora con una concentración de 0.025 M. El objetivo fue analizar la transmitancia óptica en el rango UV-Vis-NIR y determinar la energía de banda prohibida (band gap) del material.

Por otro lado, mediante el método de Tauc, se estimó el valor de la energía de banda prohibida (E_g) de las películas. A partir de la gráfica de $(\alpha h\nu)^2$ en función de la energía, se realizó una extrapolación lineal cuya intersección con el eje de energía arrojó un valor de **3.955 eV**. Este valor es característico de ZnS y confirma que se trata de un material con banda prohibida ancha, adecuado para funcionar como capa activa o transparente en dispositivos optoelectrónicos.

Con las observaciones realizadas en las pruebas de laboratorio, y sabiendo que la producción de películas semiconductoras por medio de spray, es un proceso que implica la descomposición de los elementos químicos a altas temperaturas en la que posteriormente serán formados óxidos complejos. Para realizar el depósito de semiconductor, es necesario un equipo especial y automatizado teniendo en cuenta los parámetros se ha diseñado el siguiente prototipo con las características que se describen a continuación.

El dispositivo contará con un base calefactora por medio de resistencias tipo cartucho son aquellas que están insertadas en una vaina mecánica la cual contiene materiales que la aíslan para una manipulación más segura de este tipo, son fabricadas con la mejor calidad ya que su utilización exige tener los mejores estándares de calidad, ya que son de tipo industrial donde usan todo tipo de materiales los cuales suelen ser corrosivos como son los de tipo químico, pero con la calidad que están hecho son muy resistentes incluso a las altas temperaturas lo cual es conveniente para el tipo de aplicación que desee, además su procedimiento mecánico permite que haya una excelente transferencia del calor probando así su eficiencia. (Indu, 2023).

Contendrá un eje central, el cual mide 270mm, este es el que permitirá que el modelo pueda girar de forma continua. Posteriormente, se armaron dos bases las cuales van en medio del modelo, estas son donde se encontrarán las chumaceras y los otros componentes mencionados, estas bases tienen una medida de 150mm por lado. Por último, se formaron los soportes que sostendrán el modelo ya armado, los cuales serán 5 tubos con una medida de 279.90mm de altura.

Para la parte superior en donde se encuentra el calentador, se colocaron dos bases en forma de sándwich que servirán para colocar las resistencias en medio de ellas, estas

tienen una medida de 85.70mm x 69mm. Por último, se colocó una base como soporte la cual mide exactamente lo mismo que la anterior mencionada, estas estarán conectadas mediante unos tornillos de 80mm de alto. A continuación, Figura 6, se presenta el modelado 3D del modelo propuesto.

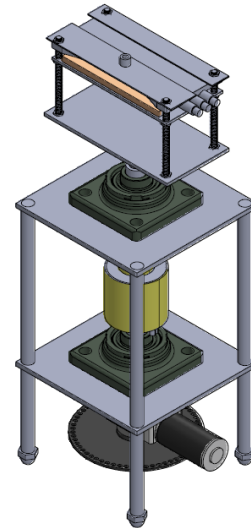


Figura 6. Modelo en SolidWorks TM. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, Figura 7, se presenta el prototipo real. En la imagen se visualiza Slip ring, pieza clave para que los conductores no se enreden cuando la placa calefactora este rotando. En la inferior se visualiza el motor para la rotación.

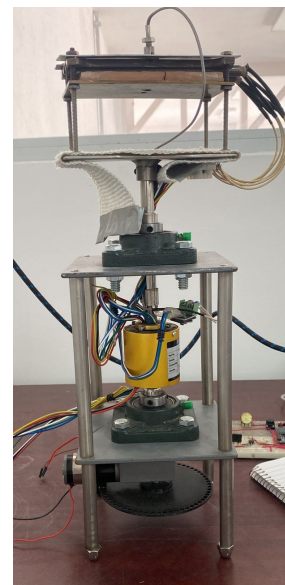


Figura 7. Modelo final armado. Fuente: Elaboración propia.

Las características generales que tiene el prototipo son las mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de prototipo. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura	25-700 grados centígrados
RPM	5-12 RPM
Sensor de Temperatura	Max6675
Sensor de RPM	Infrarojo
Resistencias calefactoras	4 X 200W
Material	Acero AISI 304 , Acero inoxidable, AISI 316 Aluminio, aleación 2024-T6
Distancia de boquilla Spray	20 cm
SlipRing	RX 00709001

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de transmitancia muestran que las películas presentan un comportamiento óptico típico de materiales semiconductores, con una transición abrupta entre los 320 y 350 nm, lo que indica la región donde comienza la absorción fundamental. En el rango visible (400–700 nm) e infrarrojo cercano (hasta 1200 nm), las muestras alcanzan altos valores de transmitancia, con promedios entre 79.95% y 83.49%. Esto sugiere que las películas tienen una buena transparencia, lo cual es deseable para aplicaciones optoelectrónicas como celdas solares o recubrimientos anti reflejantes.

Las películas delgadas de ZnS preparadas con una concentración de 0.025 M muestran un alto nivel de transparencia en el espectro visible y una energía de band gap correspondiente a lo esperado para este tipo de material. Estas características las convierten en una opción viable para diversas aplicaciones tecnológicas, particularmente en el campo de la electrónica y la fotónica.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que las películas delgadas de ZnS, depositadas mediante spray pirolítico a partir de una solución de concentración 0.025 M, presentan un comportamiento óptico característico de materiales semiconductores. Se observó una transición abrupta de transmitancia entre 320 y 350nm, lo que indica el inicio de la absorción fundamental. En el rango visible (400–700nm) e infrarrojo cercano (hasta 1200nm), las películas alcanzaron valores de transmitancia promedio entre 79.95% y 83.49%, lo que refleja una alta transparencia, favorable para aplicaciones optoelectrónicas como celdas solares o recubrimientos anti reflejantes. Adicionalmente, se determinó una energía de banda prohibida (Eg) de 3.955 eV, coherente con los

valores esperados para este tipo de material, confirmando su potencial para aplicaciones en el ámbito de la electrónica y la fotónica.

Por otra parte, el desarrollo del prototipo de deposición térmica por spray respondió a las necesidades técnicas identificadas durante las pruebas de laboratorio, especialmente en lo referente a operar en condiciones de alta temperatura y con materiales potencialmente corrosivos. El sistema diseñado permite un rango operativo entre 25 y 700 °C y una rotación ajustable de 5 a 12RPM, facilitando un control térmico preciso y un recubrimiento uniforme. La integración de sensores especializados (MAX6675 para temperatura y un sensor infrarrojo para velocidad de rotación), junto con cuatro resistencias calefactoras de 200W, garantiza una distribución térmica eficiente y una retroalimentación confiable del sistema.

El diseño estructural robusto, construido con materiales como acero inoxidable AISI 304 y 316, así como aluminio con aleación 2024-T6, asegura durabilidad, resistencia a la corrosión y estabilidad mecánica. La inclusión de un slip ring RX 00709001 permite la transmisión continua de señales eléctricas en componentes giratorios, optimizando el desempeño del sistema rotatorio. Finalmente, la disposición de la boquilla a una distancia de 20 cm del sustrato contribuye a una nebulización controlada y efectiva. En conjunto, los resultados experimentales y el diseño del prototipo confirman la viabilidad de este sistema para la síntesis de películas semiconductoras mediante spray pirolítico en aplicaciones industriales avanzadas.

REFERENCIAS

- Contaval, & Contaval. (2019, May 29). *¿Qué Es Un Slipring O Junta Rotativa Eléctrica?* - Contaval. *Contaval - Automatización Industrial Desde 1.982*.
- Estévez, A. (2020, January 29). *Motorreductores: Cómo Funcionan Y De Qué Elementos Están Compuestos* - Roydisa. Roydisa.
- Hubot. (2023, October 22). *Motorreductor Alto Torque 12v Autofrenado (Sku 1079m)* | Hubot. <https://Hubot.Cl/Producto/Motorreductor-Alto-Torque-12v-22-Kgcm-Sku-1079/>
- Indu. (2023, March 24). *¿Qué Son Las Resistencias Tipo Cartucho?* Indu-Resistencias. <https://www.Resistencias-Elctricas.Org/Productos/Que-Son-Las-Resistencias-Tipo-Cartucho>

Pinto Gómez, J. P. (2018). Diseño Y Construcción De Un Sistema Spray Pirólisiscontrolado Por Labview.
Felipe Pinto Gómez Universidad De Americafacultad De Ingenieriasprograma De Ingenieria Mecánicabogotá D.C2018.

Ruiz Aguirre, L. R., & Cano Ramírez, J. C. (2012).
Diseño De Equipo De Deposición Por Aspersión Pírolítica, Para Aplicación En Celdas Solares.
Centro De Investigación En Materiales Avanzados S.C. División De Estudios De Posgrado.