

CITID, Año 2, Numero 2, 2025 - 2026 es una revista bianual, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaria de Educación Pública, a través del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Av. Universidad No. 12002, Quinto Piso, Col. Xoco, Alcaldía Benito Juárez C.P. 03330, Ciudad de Reserva México, Tel 5536002500 Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editor Responsable Dra. María Lidia Palacios Contreras. de derechos al uso exclusivo No. 04-2023-092911362100-102, ISSN No. 2992-8516, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: Dra. Areli Marlen Salgado Delgado, profesora investigadora del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Col. Centro, Zacatepec, Morelos, C.P. 62780, Tel. (734) 3431394, fecha de última actualización 10 de julio de 2025. El objetivo de la revista es establecer un espacio que permite visualizar los aportes científicos ingenieriles, y administrativas académicas y de en educación diferentes que disciplinas generan los investigadores, docentes y expertos y así por medio de una publicación académica arbitrada en formato electrónico dar la difusión y divulgación de proyectos presentados en el CITID.

Las publicaciones de los artículos son sometidas a revisión por un Comité de Arbitraje y el contenido es responsabilidad de y no necesariamente reflejan la postura de los autores editores de la publicación. Queda prohibida la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Tecnológico de Zacatepec, salvo que sea citada la fuente de origen.

Síntesis y caracterización de ftalocianina de erbio depositada como película delgada sobre sustratos de silicio poroso.

P. B. GARCIA-DÍAZ¹, D. H. CUATE-GOMEZ², A. GARZÓ-ROMÁN³, C. ZUÑIGA-ISLAS³

¹Universidad Interamericana A.C. Departamento de ingeniería, Lateral Sur de la Vía Atlixcáyotl #7007, Municipio de San Andrés Cholula, Puebla. pb28@hotmail.com

²Instituto Tecnológico Superior Campus Progreso, Blvd. Tecnológico de Progreso S/N, Centro, 97320 Progreso, Yucatán. - dhcg.inv@gmail.com

³Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Calle Luis Enrique Erro, Santa María Tonantzintla, Puebla, C.P 72840– abelgr@inaoep.mx, czuniga@inaoep.mx

Área de participación: DESARROLLO DE TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN (MP)

Resumen:

El silicio es el semiconductor más común en la tecnología electrónica actual, pero su banda de energía prohibida es una limitación para aplicaciones fotónicas debido a que es de banda indirecta. Sin embargo, las nanopartículas de silicio tienen un comportamiento similar al de un material con banda de energía prohibida directa, lo que ha llevado a la investigación y desarrollo de materiales ópticamente activos, como el Silicio Poroso (SP) descubierto por Uhlir en 1957. En la actualidad, se han creado diferentes métodos para la síntesis de nanopartículas de silicio, incluyendo técnicas de electroquímica. Además, los compuestos orgánicos, en particular la familia de ftalocianinas, han sido objeto de investigación para aplicaciones optoelectrónicas, y las películas delgadas de ftalocianinas pueden ser depositadas mediante una técnica de evaporación térmica obteniendo uniformidad y propiedades físicas destacables. En este artículo, se investigaron las propiedades ópticas y estructurales del silicio poroso con una película delgada de ftalocianina de Erbio, utilizando técnicas innovadoras de depósito. Los resultados estructurales muestran morfologías de microporos y nano esferas, y las ópticas, características propias como las bandas Soret (B) y banda (Q). Estos resultados pueden tener implicaciones en el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos más eficientes y avanzados en el futuro.

Introducción.

El silicio es el semiconductor más común en la industria de la tecnología electrónica actual. Sin embargo, su banda de energía prohibida es de 1.12 eV a 300 grados Kelvin, además es de banda indirecta. Lo anterior es una de las principales limitaciones si se requiere utilizar para aplicaciones fotónicas. El silicio en volumen se comporta de diferente manera, las nanopartículas de silicio tienen un comportamiento similar al de un material con banda de energía prohibida directa. (Lannoo et al., 1996; Smith et al., 2005)

Esta deficiencia cuántica reducida del silicio trajo consigo, investigar y desarrollar materiales ópticamente activos, un caso especial fue el descubrimiento del Silicio Poroso (SP) por Uhlir en 1957. Actualmente se han creado diferentes métodos para la síntesis de las nanopartículas de silicio como lo son las técnicas de electroquímica.(Uhlir, 1956)

El uso actual de los diferentes compuestos orgánicos para los dispositivos optoelectrónicos es de una gran metodología es por ello que la familia de

ftalocianinas ha sido objeto de investigación para aplicaciones optoelectrónicas.(Gou et al., 2016; Kiran et al., 2017)

Las películas delgadas de ftalocianinas son depositadas mediante una técnica de evaporación térmica obteniendo uniformidad y propiedades físicas destacables como: Neghabi y colaboradores realizaron un estudio, donde querían determinar la irradiación gamma en películas delgadas de ftalocianinas, obteniendo propiedades interesantes en las caracterizaciones estructurales, ópticas y electrónicas. Neghabi realizó una innovación en las temperaturas de recocidos de estas películas en un intervalo de 70 a 150° C. (Vickers, 2017)

En el presente trabajo de investigación, realiza un estudio de las propiedades ópticas, y morfológicas del silicio poroso con una película delgada de ftalocianina de Erbio, utilizando técnicas innovadoras de depósito.

Sección Experimental y/o Fundamento Teórico.

Síntesis del silicio poroso (PS):

El SP fue preparado por la técnica de electro-anodización controlada para esto se siguieron una serie de pasos que a continuación se indican(Romero Paredes. G et al., n.d.).

- Se utilizo una oblea de silicio cristalino tipo p, de 1-3 Ω cm con un espesor de 280 $\mu\text{m} \pm 20\mu\text{m}$ y orientación cristalina (1 0 0); este tipo de obleas tiene una mejor conducción de corriente propiciando una reacción química eficiente. Cuando se utilizan obleas tipo n, es necesario utilizar radiación UV para excitar y generar mayor flujo de corriente.
- Preparar una solución acuosa de agua desionizada (182 $\mu\Omega$ de resistencia) con nitrato de plata al 0.002 mol.
- Preparar una solución acuosa de 20 ml de agua desionizada con 2 ml de HF (ácido fluorhídrico), acetona y metanol.
- A la oblea de silicio se realiza un proceso de limpieza, eliminando polímeros que los fabricantes colocan, esto a fin de evitar que se forme una capa de óxido. Este proceso se realizó con 3 sustancias (agua desionizada, acetona y metanol), cuando se termina de hacer la limpieza el silicio se vuelve hidrofóbico.
- Preparar una solución acuosa para hacer el depósito de nanopartículas de plata está haciendo una solución de 50ml de nitrato de plata con molaridad de 0.002 mola, 1.75 ml de peróxido de hidrogeno y 1 ml de HF.
- Nuestra solución de grabado se crea con 50ml de agua desionizada 7 ml de peróxido de hidrogeno y 4 ml de HF.
- Los sustratos son sometidos durante 1 y 5 minutos en la solución de grabado y 30 segundos en la solución con nanopartículas de plata (Ver figura 1a).

Síntesis de ftalocianina de erbio:

- La ErPc (ftalocianina de erbio) se obtuvo siguiendo un nuevo protocolo de síntesis usando un prototipo de reactor solar (De et al., 2015; Garzon-Roman et al., 2020)partir de 1,2 dicanobenceno [$C_6H_4(CN)_2$] (2.0g, 1.56×10^{-2} mol), acetato de

- erbio ($\text{Er}(\text{OOCCH}_3)_3$) (1,79 g, $5,20 \times 10^{-3} \text{ mol}$), urea [H_2NCONH_2] como fuente de nitrógeno ($0,4\text{g}, 7,82 \times 10^{-3} \text{ mol}$) y 1,8dizabicyclo [5, 4, 0] undeca-7-eno-DBN- [$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{NCNC}_4\text{H}_6$] como promotor de la formación de 1 macrociclo (100 ml de DBN).
- Posteriormente el matraz se colocó en un reactor solar de 3 lentes de Fresnel provisto de una atmosfera inerte y la lente se enfocó para elevar la temperatura del matraz a 180°C , se midió utilizando un sensor infrarrojo (IR) retorno durante un periodo de 330s.
 - La purificación de la ftalocianina se llevó a cabo mediante extracción Soxhlet con diferentes disolventes para eliminar todas las impurezas solubles.

Depósito de película delgada de ftalocianina de erbio:

Para realizar el depósito de películas delgadas de la ftalocianina, es necesario realizar los siguientes pasos:

- La solución que utilizamos con la técnica de espray pirolisis ultrasónico (USP – Ver figura 1b) es la siguiente: 100 ml de Metanol, 10 mg de ftalocianina de erbio.
- Realizar mezclado en baño ultrasónico por 10 min hasta obtener una solución homogénea.
- Para fijar el sustrato de PS (1 y 10 min) en la parrilla (Ver figura 1b) se utiliza cinta kapton, debido que soporta altas temperaturas y no deja residuos.
- El depósito de la ftalocianina de erbio utiliza 20 ml de solución de metanol y ftalocianina a una distancia de 14 cm.



Figura 1 a) obtención de silicio poroso por electroanodización y b) depósito de película delgada de ftalocianina de erbio sobre sustrato de silicio poroso.

Resultados y Discusión.

Los sustratos de silicio poroso para ser utilizado como sustratos fueron sometidos a la técnica de espectrometría RAMAN. La figura 2 muestra el espectro Raman de

los sustratos de silicio poroso (1 y 5 minutos). En posible observar un aumento en el pico de intensidad atribuido a la diferencia en tiempo de grabado al igual como es reportado por Ragavendran y colaboradores(Venkatesan et al., 2019).Esto nos permite saber la calidad del silicio poroso obtenido.

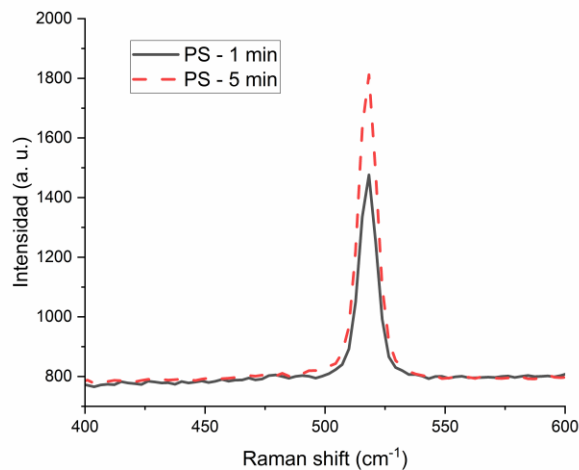


Figura 2 Espectro de espectrometría RAMAN de los sustratos de silicio poroso de 1 y 5 minutos.

La figura 3 muestra las micrografías SEM de los sustratos de silicio poroso de 1 y 5 minutos, presentando morfologías similares. Sin embargo, el tamaño del poro tiene una pequeña variación; la figura 3a tiene tamaños de poro que van de los 20 nm hasta los 35 nm de diámetro. Mientras que la figura 3b es posible observar menor cantidad de poros al igual que tamaños mas grandes que van desde los 37 nm hasta 60 nm de diámetro. Esto es atribuido al tiempo que fue dejado cada uno de los sustratos de silicio en el grabado (1 y 5 minutos).

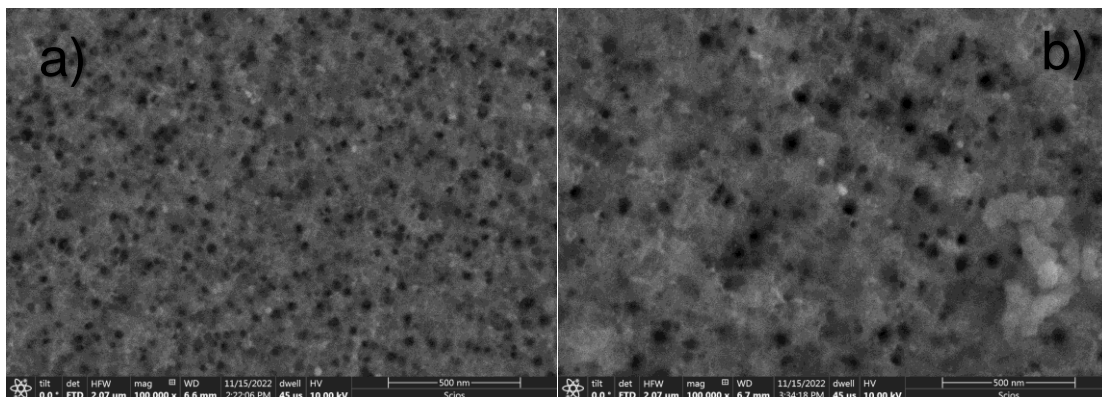


Figure 3 micrografías SEM de los sustratos de silicio poroso a) 1 minuto y b) 5 minutos

La figura 4 muestra las micrografías SEM de las películas delgadas de ftalocianina de erbio depositadas sobre sustratos de silicio poroso (1 y 5 minutos). La figura 4a se observa una aglomeración de 400 nm de diámetro proveniente de condensación a la hora de realizar el depósito, también se puede observar que la mayor cantidad de poros ha sido cubierta dejando una superficie irregular. En la figura 4b Los poros

son cubiertos en su totalidad por la ftalocianina de erbio mostrando una película delgada más uniforme y probablemente tenga mejor respuesta a excitaciones externas.

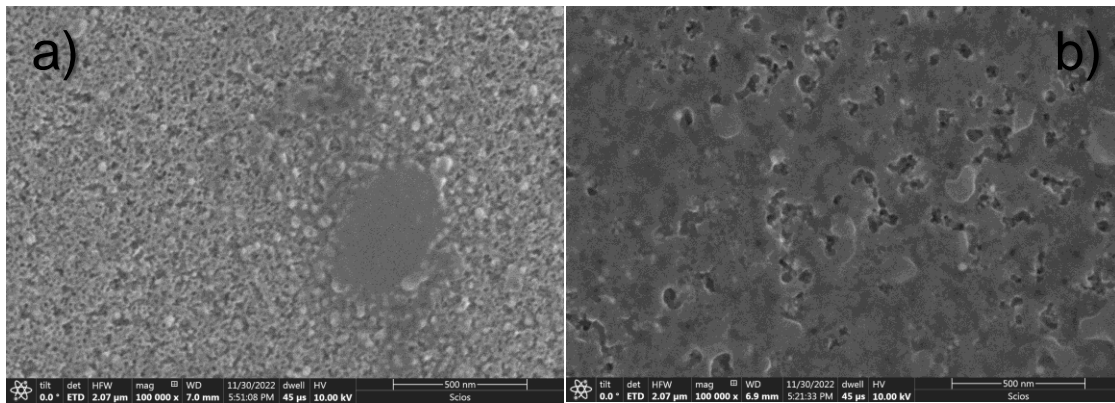


Figure 4 Micrografías SEM de películas delgadas de ftalocianina de erbio depositadas sobre sustratos de silicio poroso a) 1 minuto y b) 5 minutos

La figura 5 muestra los espectros de fotoluminiscencia pertenecientes a las películas delgadas de ftalocianina de erbio depositadas sobre sustratos de silicio poroso (1 y 5 minutos). Es importante recordar que los espectros del silicio poroso se presentan en un rango de 500 a 750 nm, tal cual lo mencionan Romero y colaboradores (Romero Paredes. G et al., s/f). En nuestros espectros están presentando una curva entre 600 y 700 nm. Sin embargo, al depositar la película delgada de ftalocianina de erbio (ErPc) este espectro es modificado en su totalidad mostrando una característica propia de las ftalocianinas, las bandas Soret (B) y bandas Q [Referencia de Manuel Salazar]. esta última tiene un efecto llamado división de Davydov (Hollebone & Stillman, 1974), provocando esta separación. En la figura 5a las bandas B, Q1 y Q2 son observadas en las longitudes de onda 432, 702 y 832 nm respectivamente. Mientras que en la figura 5b son observadas en 431, 699 y 821 nm respectivamente. Un pequeño corrimiento es observado, atribuido a estas aglomeraciones y distribución de la película delgada de ErPc mostradas en las micrografías SEM.

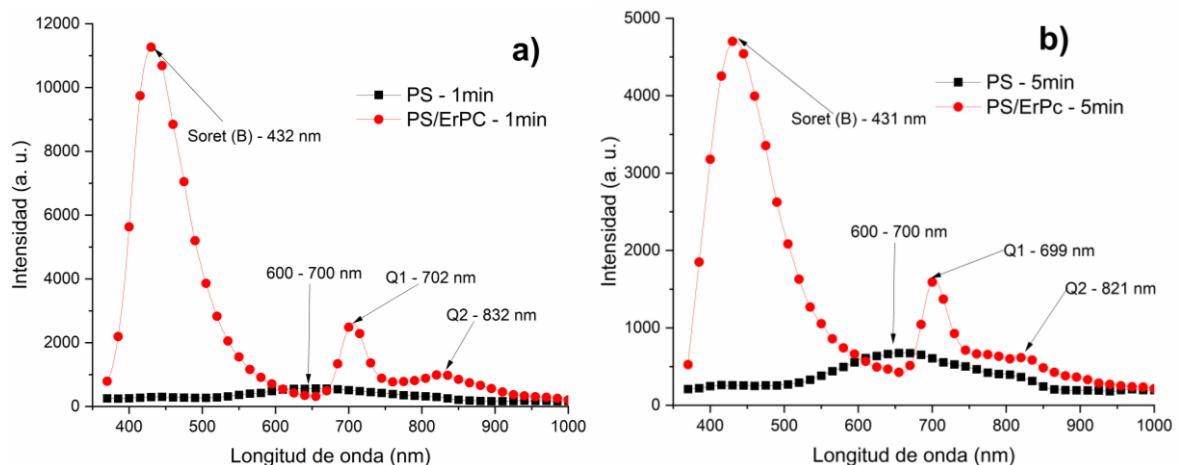


Figura 5 Espectros de fotoluminiscencia de las películas delgadas de ftalocianina de erbio depositadas sobre sustratos de silicio poroso(a)1 y b) 5 min).

Conclusiones.

Se presentan tres procesos diferentes en la síntesis de materiales. En primer lugar, se describe la preparación de silicio poroso mediante la técnica de electroanodización controlada con una oblea de silicio cristalino tipo p, seguida del depósito de nanopartículas de plata. En segundo lugar, se presenta un nuevo protocolo de síntesis de ftalocianina de erbio utilizando un reactor solar y extracción Soxhlet para la purificación. En tercer lugar, se detalla el depósito de películas delgadas de ftalocianina de erbio mediante la técnica de espray pirolisis ultrasónico en sustratos de silicio poroso (1 y 5 minutos). Finalmente, se realizaron las caracterizaciones de las películas delgadas de ftalocianina de erbio sobre sustratos de silicio poroso, con espectrometría RAMAN, Fotoluminiscencia y micrografías SEM para evaluar la calidad de estas películas sobre sustratos de silicio poroso. En conjunto, estos procesos son útiles para la obtención de materiales semiconductores con propiedades ópticas interesantes para su futura implementación como dispositivos optoelectrónicos.

Agradecimientos.

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por prestar laboratorio, reactivos y equipo de caracterización. También agradecemos al Laboratorio de Síntesis de Semiconductores Orgánicos (LaSSO), por la síntesis de ftalocianina de erbio.

Referencias

- De, M., Fin, T., Sant, G., D'alacant, J., & Gomis, M. S. (2015). *FACULTAD DE FARMACIA Grado en Farmacia SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE FTALOCIANINAS DE SILICIO COMO PERCURSORES DE FÁRMACOS PARA TERAPIA FOTODINÁMICA CONTRA EL CÁNCER.*
- Garzon-Roman, A., Cuate-Gomez, D. H., Zuñiga-Islas, C., Sosa-Sanchez, J. L., & Lopez-Huerta, F. (2020). Erbium phthalocyanine on porous silicon: Morphological, optical, and electrical characterization, for its possible application as a photodetector. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, 112309. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112309>
- Gou, H., Wang, G., Tong, Y., Tang, Q., & Liu, Y. (2016). Electronic and optoelectronic properties of zinc phthalocyanine single-crystal nanobelt transistors. *Organic Electronics*, 30, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.12.019>
- Hollebone, B. R., & Stillman, M. J. (1974). Observation of Davydov splitting in the MCD spectra of α metal-free phthalocyanine. *Chemical Physics Letters*, 29(2), 284–286. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(74\)85032-3](https://doi.org/10.1016/0009-2614(74)85032-3)

- Kiran, M. R., Ulla, H., Satyanarayan, M. N., & Umesh, G. (2017). Optoelectronic properties of hybrid diodes based on vanadyl-phthalocyanine and zinc oxide. *Superlattices and Microstructures*, 112, 654–664. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.10.023>
- Lannoo, M., Delerue, C., & Allan, G. (1996). Theory of radiative and nonradiative transitions for semiconductor nanocrystals. *Journal of Luminescence*, 70(1-6 SPEC. ISS.). [https://doi.org/10.1016/0022-2313\(96\)00053-1](https://doi.org/10.1016/0022-2313(96)00053-1)
- Romero Paredes. G, Peña Sierra . R, & Castillo Cabrera . G. (n.d.). *Fabricación y caracterización de diodos electro-luminiscentes de silicio poroso*. Retrieved March 21, 2023, from <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v48n2/v48n2a2.pdf>
- Smith, A., Yamani, Z. H., Roberts, N., Turner, J., Habbal, S. R., Granick, S., & Nayfeh, M. H. (2005). Observation of strong direct-like oscillator strength in the photoluminescence of Si nanoparticles. *Physical Review B*, 72(20), 205307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.205307>
- Uhlir, A. (1956). Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon. *Bell System Technical Journal*, 35(2), 333–347. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x>
- Venkatesan, R., Mayandi, J., Pearce, J. M., & Venkatachalapathy, V. (2019). Influence of metal assisted chemical etching time period on mesoporous structure in as-cut upgraded metallurgical grade silicon for solar cell application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(9), 8676–8685. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01191-6>
- Vickers, N. J. (2017). Animal Communication: When I'm Calling You, Will You Answer Too? *Current Biology*, 27(14), R713–R715. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064>

Autorización y renuncia.

Los autores del presente artículo autorizan al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec para publicar el escrito en el libro electrónico del **CONGRESO INTERNACIONAL EN TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN y DOCENCIA 2023**. El Instituto o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.