

NANOESTRUCTURAS DE PELÍCULAS DELGADAS DE CUO/ZNO Y SU APLICACIÓN EN LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA, UNA REVISIÓN

CUO/ZNO THIN FILM NANOSTRUCTURES AND THEIR APPLICATION IN PHOTOCATALYTIC ACTIVITY, A REVIEW

GERARDO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ¹

VÍCTOR HUGO MARTÍNEZ
LANDEROS¹

LÁZARO ABDIEL FALCÓN FRANCO¹

LUIS ALFONSO GRACÍA CERDA²

RESUMEN

Las películas delgadas de óxidos de cobre (CuO) y óxido de zinc (ZnO) han captado una atención significativa en el ámbito de la investigación científica, principalmente por su notable eficiencia fotocatalítica en la degradación de contaminantes orgánicos cuando son sometidas a irradiación de luz. Este interés se debe a la creciente necesidad de encontrar soluciones efectivas para la purificación ambiental y la eliminación de desechos tóxicos. Entre los diversos métodos de síntesis utilizados para la deposición de estas películas delgadas, se destacan tanto técnicas químicas como físicas, cada una con sus propias ventajas y aplicaciones. Esta revisión se centra en los avances recientes en la síntesis de películas delgadas de CuO/ZnO, tanto de manera individual como en forma de heteroestructura, abordando factores clave que influyen en la fotodegradación como el pH, concentraciones del material y del contaminante, además de los resultados obtenidos en términos de actividad fotocatalítica. De igual manera, se ve la importancia de el espesor de las películas delgadas y su captación con el colorante, todo esto para optimizar las propiedades de las películas delgadas. Además, se discute sobre el uso de las heteroestructuras como fotocatalizadores al tener un comportamiento diferente en cuanto a sus propiedades eléctricas debido a un cambio energético propio de la heteroestructura, y sobre su alta eficiencia fotocatalítica al dar porcentajes altos de remoción de colorantes en pruebas de fotodegradación. En conjunto, esta revisión proporciona una perspectiva amplia sobre el potencial de los óxidos de cobre y zinc en el desarrollo de materiales fotocatalíticos eficaces para la degradación de contaminantes.

Palabras clave: fotocatalizador; semiconductor; óxido de zinc; óxido de cobre; ancho de banda.

1. Facultad de Metalurgia, Unidad Norte, UAdeC.
2. Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coah.

Correspondencia
vmartinezlanderos@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000/0001/5881/4048>

Fecha de recepción
15 de enero de 2025.

Fecha de aceptación
14 de mayo de 2025.

ABSTRACT

Thin films of copper oxides (CuO) and zinc oxide (ZnO) have garnered significant attention in scientific research, primarily due to their remarkable photocatalytic efficiency in the degradation of organic pollutants under light irradiation. This interest stems from the growing need to find effective solutions for environmental purification and the elimination of toxic waste. Among the various synthesis methods used for the deposition of these thin films, both chemical and physical techniques stand out, each with their own advantages and applications. This review focuses on recent advances in the synthesis of CuO/ZnO thin films, both individually and as heterostructures, addressing key factors influencing photodegradation, such as pH, material and pollutant concentrations, and the resulting photocatalytic activity. Additionally, it highlights the importance of thin film thickness and dye adsorption, all aimed at optimizing the properties of these films. Furthermore, the use of heterostructures as photocatalysts is discussed, considering their distinct electrical properties due to energy shifts inherent to the heterostructure, as well as their high photocatalytic efficiency, demonstrated by high dye removal percentages in photodegradation tests. Overall, this review provides a broad perspective on the potential of copper and zinc oxides in the development of efficient photocatalytic materials for pollutant degradation.

Keywords: photocatalyst; semiconductor; zinc oxide; copper oxide; bandgap.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, el crecimiento del sector industrial, así como del sector urbano, ha ido aumentando de forma exponencial, lo que ha provocado un aumento de la contaminación del agua. En consecuencia, el tratamiento de esta contaminación representa un reto importante para la comunidad científica (Raizada y col., 2019).

En la actualidad, la recuperación y reutilización del agua han mostrado una mayor relevancia en todo el mundo, esto a causa de su escasez derivada del cambio climático y a una gestión inadecuada de su suministro. Esto incluye un limitado acceso sobre fuentes de agua limpia además de una demanda



CienciAcierta

que supera los recursos disponibles. En una economía mundial, donde la población es cada vez más numerosa, el acceso a este recurso está convirtiéndose en un desafío cada vez más crítico.

Existen diferentes técnicas de tratamiento de aguas para eliminar los contaminantes presentes como la adsorción, la separación por membranas y la coagulación, sin embargo, estos métodos consisten en concentrar o pasar a fase sólida los contaminantes orgánicos presentes en el agua, implicando posteriormente su recolección. Por esta razón, actualmente se proponen procesos de oxidación avanzada (POAs) para la remoción y degradación de estos contaminantes, estos procesos son la fotocatálisis homogénea y heterogénea (Ong y col., 2018).

En este tipo de aplicaciones, es necesario evaluar el tipo de estructura nanométrica o micrométrica del fotocatalizador a utilizar, específicamente, el uso de películas delgadas como material nanoestructurado proporciona una mayor eficiencia en comparación con otras nanoestructuras como los nanotubos (Nazar Elamin y Ammar Elsanousi, 2013).

Las películas delgadas de óxidos metálicos son recubrimientos que poseen propiedades eléctricas y ópticas, las cuales denotan relevancia al ser materiales semiconductores. A partir de cambios en su morfología, su composición química, etc., se pueden modificar sus características ópticas y eléctricas para su aplicación en sensores de gases, ensayos fotocatalíticos, recubrimientos, etc. (Amakali y col., 2020). Las películas delgadas, al estar formadas por óxidos metálicos semiconductores son fotocatalizadores que se usan en diferentes procesos químicos tal como se aprecia en la Figura 1.

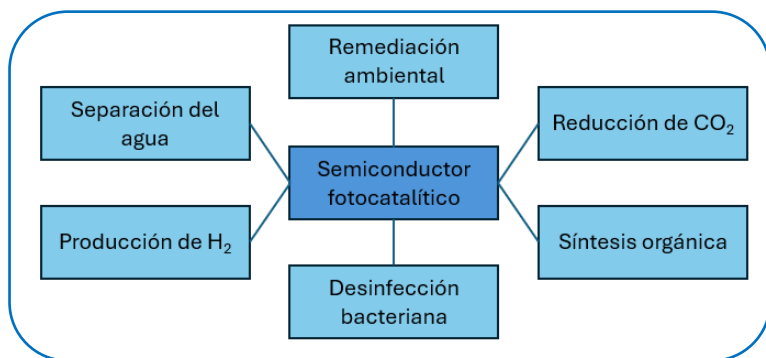


Figura. 1. Aplicaciones de semiconductores como fotocatalizadores. (Imagen adaptada de Pedanekar y col. 2020)



2. PELÍCULAS DELGADAS

Las películas delgadas son estructuras bidimensionales con un espesor que varía entre algunos nanómetros o unos pocos micrómetros. Algunas estructuras que pueden formarse son nanopartículas, nanovarillas, nanotubos, entre otros. Las propiedades que manifiestan las películas delgadas están directamente relacionadas a su composición química y las condiciones y métodos de deposición utilizados (Pedanekar y col., 2020).

Existen varios métodos de deposición para la síntesis de películas delgadas, dependiendo del material a depositar y la aplicación se podrá utilizar un método específico (Abegunde y col., 2019). Estos métodos de deposición se clasifican en métodos químicos y físicos (Figura 2).



Figura. 2. Métodos de depósito de películas delgadas.

2.1 PROPIEDADES ÓPTICAS Y ELÉCTRICAS DE LAS PELÍCULAS DELGADAS

Teniendo como principio la teoría de bandas, los conductores no necesitan de un estímulo para que los electrones de la capa de valencia salten a la capa de conducción, los aislantes tienen una gran brecha energética entre la banda de valencia y de conducción impidiendo el flujo de electrones, los semiconductores manifiestan un espaciamiento energético entre ambas bandas denominado bandgap (3.37 eV y 1.2 eV en el caso del ZnO y CuO, respectivamente), permitiendo la conducción eléctrica. Asimismo, como propiedades ópticas destacan la capacidad de absorbancia y transmitancia ante luz ultravioleta y visible, las cuales tiene gran relevancia en aplicaciones



donde los semiconductores funcionan como materiales fotocatalizadores al absorber luz para la degradación de agentes contaminantes (Xia y col., 2016).

3. FOTOCATÁLISIS

La fotocatalisis es un proceso en el que, utilizando materiales semiconductores, se acelera una reacción de fotodegradación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. Estos materiales semiconductores se denominan fotocatalizadores y pueden ser óxidos metálicos, entre los cuales destacan el óxido de titanio (TiO_2), el óxido de zinc (ZnO), el óxido de cobre II (CuO), el óxido de estaño (SnO_2), entre otros (Danish y col., 2021).

El principio de la fotocatalisis involucra la producción de radicales hidroxilos ($\text{OH}^\cdot$) y aniones superóxido ($\text{O}_2^\cdot$). De los dos, el ($\text{OH}^\cdot$) muestra un alto potencial de oxidación, es por ello por lo que funge a manera de especie oxidante mayoritaria, sin embargo, el ($\text{OH}^\cdot$) y el $\text{O}_2^\cdot$ operan como oxidantes que tienen la tarea de degradar compuestos orgánicos. Posterior a la formación de estos radicales y aniones, se produce CO_2 y H_2O a partir del contaminante orgánico tratado, estos son menos dañinos, debido a la reacción fotoquímica como se muestra en la Figura 3. (Pedanekar y col., 2020), en la cual se aprecia el proceso que se lleva a cabo en la fotodegradación de contaminantes.

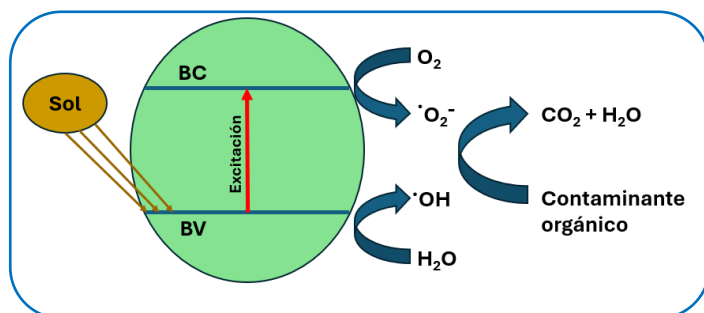


Figura. 3. Mecanismo de fotodegradación de contaminantes. (Adaptado de Pedanekar y col 2020).

4. ÓXIDO DE ZINC

El óxido de zinc es uno de los materiales semiconductores más utilizados en la actualidad debido a su versatilidad de propiedades físicas y químicas que pueden cambiarse por efecto de la temperatura, estructura y morfología. Entre sus aplicaciones actuales se pueden mencionar como sensores de gas, diodos emisores de luz UV, celdas solares, entre otras (Raha y Ahmaruzzaman, 2022).

4.1 APLICACIONES FOTOCATALÍTICAS DEL ÓXIDO DE ZINC (ZnO)

El óxido de zinc es un semiconductor extrínseco tipo n del grupo II-VI, este material tiene una banda de energía prohibida (band gap) de 3.37 eV. Además, puesto que existe una diferencia considerable de electronegatividad entre el oxígeno y el zinc, el oxígeno genera altos niveles de ionicidad dentro del enlace y, asimismo, esto causa una mayor repulsión entre las nubes de carga electrónica, quedando los átomos lo suficientemente alejados para compensar dicha repulsión y formando una estructura cristalina hexagonal tipo wurzita. Por esto, y debido a alta estabilidad química, no toxicidad y altos rendimientos cuánticos es considerado como un candidato eficiente como fotocatalizador (Xia y col., 2016).

Tabla 1. Investigaciones sobre fotocatálisis utilizando ZnO para degradar contaminantes orgánicos

Material	Contaminante	Resultado	Autor
ZnO	Azul de metileno	Remoción de más del 60% del contaminante en un tiempo de 540 minutos	(Kulis-Kapuscinska y col., 2023)
ZnO	Azul de metileno	Remoción de contaminante entre el 60 y 80% en un plazo de 120 minutos	(Wojtasik y col., 2023)
ZnO, ZnO-Al	Azul de metileno	Remoción del contaminante del 60 % en el caso del ZnO y del 80% en caso del ZnO dopado con Al, ambos en 380 minutos	(Islam y col., 2019)
ZnO	Naranja de metilo	Remoción del contaminante desde un 73 a 88% en 180 minutos	(Lv y col., 2011)

En la Tabla 1 se muestra como el uso del óxido de zinc ha ganado relevancia en estos últimos años para la remoción de contaminantes orgánicos, este material fotocatalizador puede utilizarse de manera individual o en forma de heteroestructuras.

5. ÓXIDOS DE COBRE (CuO)

Los óxidos de cobre, ya sea en su forma de óxido cuproso (Cu_2O) u óxido cúprico (CuO), es otro material semiconductor que ha ido ganando interés en los últimos años, tanto en el sector industrial como en la comunidad científica. Esto se debe a su costo asequible y a sus propiedades fotoelectrónicas, fotoquímicas y termosolares, entre otras, que resultan de gran interés (López y Scarioni, 2016).

5.1. APLICACIONES FOTOCATALÍTICAS DE ÓXIDOS DE COBRE

Los óxidos de cobre presentan una amplia gama de aplicaciones, entre las que se pueden mencionar están la catálisis heterogénea, los sensores de gases, las celdas electroquímicas, los dispositivos electrónicos como la unión p-n de los diodos, etc. El óxido de cobre al ser un semiconductor de tipo p y tener una banda prohibida (bandgap) entre 1.21 y 2.1 eV para el CuO y CuO_2 , respectivamente (Tounsi y col., 2015), lo convierte en un buen candidato para la aplicación de fotodegradación de contaminantes orgánicos debido a la poca energía que necesita para promover la reacción necesaria en la fotocatalisis.

En la Tabla 2 se aprecia que en los años recientes el uso del óxido de cobre II como fotocatalizador para la remoción de diversos contaminantes orgánicos ha ganado un gran auge, en algunos casos se logra la degradación completa del contaminante.



Tabla 2. Investigaciones sobre fotocátalisis utilizando CuO para degradar contaminantes orgánicos

Material	Contaminante	Resultado	Autor
CuO-Ag	Naranja II	Remoción del contaminante 50% en 5 horas	(Madiha y col., 2023)
CuO	Azul de metileno	Remoción del contaminante cerca del 100% en 200 minutos	(Katal y col., 2020)
CuO	Azul de metileno	Remoción del contaminante 90% en 90 minutos	(Singh y col., 2020)
CuO	Azul de metileno	Remoción del contaminante 88% en 120 minutos	(Sahu y col., 2019)

6. HETEROUNIONES Y SU ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

Una heterounión se define como la interfase entre dos semiconductores diferentes que tiene una estructura de bandas desigual y puede dar lugar a una alineación entre estas bandas (Low y col., 2017). Actualmente las heteroestructuras se han vuelto muy interesantes debido a su gran capacidad de rendimiento y eficacia en la degradación de contaminantes, ya que al trabajar con heteroestructuras el espaciamiento entre bandas de conducción y valencia tiende a estrecharse, por lo cual el flujo de electrones entre dichas bandas es mayor y se requiere menos energía para que los electrones pasen de una banda a otra, al contrario de los materiales por separado como en el caso de heteroestructuras de CuO/ZnO (Pal y col., n.d.).

En la Tabla 3 se observa que en años recientes la implementación de heteroestructuras como fotocatalizadores es un tópico novedoso e innovador debido a la completa remoción de colorantes para pruebas de fotodegradación.

Tabla 3. Investigaciones sobre fotocatalisis utilizando heteroestructuras de CuO/ZnO para degradar contaminantes orgánicos

Material	Contaminante	Resultado	Autor
CuO/ZnO	Colorante acriflavina	Remoción completa en 330 minutos	(Allawi y col., 2024)
CuO/ZnO	Azul de metileno	Remoción completa del contaminante en 80 minutos	(Oliveira y col., 2020)
CuO/ZnO	Azul de metileno	Remoción del 84% del contaminante en 120 minutos	(Xu y col., 2019)
CuO/ZnO	Azul de metileno	Remoción del 90% del contaminante en 60 minutos	(Liu y col., 2008)

7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FOTOCATÁLISIS

7.1. ESPESOR DE LA PELÍCULA DELGADA

El espesor de las películas delgadas de óxidos metálicos es un punto crucial para la fotodegradación, varios autores afirman que los espesores delgados no favorecen a la fotodegradación y que espesores gruesos favorecen la absorción de luz hasta cierto punto, para el caso de películas delgadas de óxido de titanio (TiO_2) con siete capas, se observó una saturación del óxido (Bensouici y col., 2015), de igual manera Kaneva y col., 2015 mencionan la relevancia del espesor, en el caso de óxido de zinc (ZnO), una película de una capa presentó menor eficiencia fotocatalítica en comparación con una con siete capas que tuvo la mejor eficiencia.

7.2. PH EN LA SÍNTESIS DE PELÍCULAS DELGADAS

El efecto del pH en la síntesis de películas delgadas tiene un papel clave en la fotocatalisis, ya que este parámetro afecta las propiedades ópticas y morfológicas del material depositado.

En cuanto a las propiedades ópticas de las películas delgadas, se ha reportado por medio de estudios de caracterización de ultravioleta visible (UV-Vis) en rango de longitudes de onda de 200 a 800 nm, que la absorbancia



se mantiene en un nivel estable como lo menciona Intaphong y col., 2020 en un estudio a diferentes valores de pH.

En cuanto a las propiedades morfológicas, este mismo autor menciona que en la caracterización por microscopía electrónica de transmisión (TEM), que a un pH de 8 se favorece una estructura porosa del material y de igual manera incrementa la capacidad de absorción del contaminante para degradarlo.

7.3. CONCENTRACIONES DE FOTOCATALIZADOR Y DEL CONTAMINANTE

Un factor relevante para la eficiencia fotocatalítica de los fotocatalizadores son las cargas o concentraciones que se tiene tanto del material fotocatalizador como del contaminante, se ha demostrado que a mayores cargas del fotocatalizador se favorece la fotodegradación debido a que se aumentan la velocidad de reacción ocurrida en el proceso. Por otra parte, la concentración del contaminante influye de manera directa debido a que, a mayor concentración del pigmento, el área de superficie relativa expuesta a los factores ambientales que causan la fotodegradación será menor. Es decir, a mayor concentración inicial de colorante, se necesita más carga del fotocatalizador para su degradación. Por lo tanto, es importante determinar la cantidad óptima de fotocatalizador para asegurar una buena eficiencia y evitar el uso innecesario de material (Groeneveld y col., 2023).

CONCLUSIONES

Las películas delgadas de óxidos de cobre (CuO) y óxido de zinc (ZnO) son materiales prometedores en el ámbito de la fotocatálisis, especialmente en la degradación de contaminantes orgánicos irradiados con luz ultravioleta o visible. Su alta eficiencia fotocatalítica es esencial para abordar la creciente problemática de la contaminación del agua, un desafío ambiental crítico que afecta la salud pública y los ecosistemas. A través de procesos fotocatalíticos, estas películas delgadas pueden contribuir significativamente a la purificación del agua al descomponer compuestos tóxicos y patógenos.

La diversidad de métodos de síntesis, tanto químicos como físicos, permite la optimización de sus propiedades, adaptándose a diferentes requisitos y aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas. Sin embargo, para maximizar su rendimiento, es esencial un control riguroso en los parámetros de deposición y una caracterización precisa de los materiales obtenidos.

El desarrollo de heteroestructuras no solo aporta a la fotodegradación de contaminantes del agua, sino que también abre nuevas oportunidades para la investigación en conservación de recursos y reducción de impacto ambiental. A medida que se superan los desafíos asociados a su producción y aplicación, el uso de películas delgadas de CuO/ZnO podría convertirse en una estrategia clave en la lucha contra la contaminación hídrica, promoviendo un futuro más limpio y sostenible.

REFERENCIAS

- Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., & Ude, A. U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science* 6: 174–199. AIMS Press. <https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2019.2.174>
- Allawi, F., Mahdi, M. A., Kadhim, M. J., & Omran Alkhayatt, A. H. (2024). Preparation and characterization of ZnO/CuO nanocomposites thin films for highly efficient visible-light photocatalysis of acriflavine dye. *Optik*, 303: 171722 <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171722>
- Amakali, T., Daniel, L. S., Uahengo, V., Dzade, N. Y., & de Leeuw, N. H. (2020). Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by molecular precursor and sol–gel methods. *Crystals*, 10: 132. <https://doi.org/10.3390/cryst10020132>
- Bensouici, F., Bououdina, M., Iratni, A., Toubane, M., & Tala-Ighil, R. (2015). Effect of thickness on photocatalytic activity of TiO₂ thin films. *Progress in Clean Energy*, 1: 763–776. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16709-1_56
- Danish, M. S. S., Estrella, L. L., Alemaida, I. M. A., Lisin, A., Moiseev, N., Ahmadi, M., Nazari, M., Wali, M., Zaheb, H., & Senjyu, T. (2021). Photocatalytic applications of metal oxides for sustainable environmental remediation. *Metals*, 11: 1–25. <https://doi.org/10.3390/met11010080>

- Groeneveld, I., Kanelli, M., Ariese, F., & van Bommel, M. R. (2023). Parameters that affect the photodegradation of dyes and pigments in solution and on substrate – An overview. In *Dyes and Pigments* 210: 110999. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.dye pig.2022.110999>
- Intaphong, P., Phuruangrat, A., Karthik, K., Dumrongrojthanath, P., Thongtem, T., & Thongtem, S. (2020). Effect of pH on Phase, Morphology and Photocatalytic Properties of BiOBr Synthesized by Hydrothermal Method. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(3): 714–721. <https://doi.org/10.1007/s10904-019-01259-0>
- Islam, M. R., Rahman, M., Farhad, S. F. U., & Podder, J. (2019). Structural, optical and photocatalysis properties of sol–gel deposited Al-doped ZnO thin films. *Surfaces and Interfaces*, 16: 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.05.007>
- Kaneva, N. V., Tzenov Dimitrov, D., & Svinarov, I. (2015). Effect of thickness on the photocatalytic properties of ZnO thin films. In *Article in Bulgarian Chemical Communications*, 47: 395-401. <https://www.researchgate.net/publication/288436875>
- Katal, R., Masudy-panah, S., Kong, E. Y. J., Dasineh Khiavi, N., Abadi Farahani, M. H. D., & Gong, X. (2020). Nanocrystal-engineered thin CuO film photocatalyst for visible-light-driven photocatalytic degradation of organic pollutant in aqueous solution. *Catalysis Today*, 340: 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.12.019>
- Kulis-Kapuscinska, A., Kwoka, M., Borysiewicz, M. A., Wojciechowski, T., Licciardello, N., Sgarzi, M., & Cuniberti, G. (2023). Photocatalytic degradation of methylene blue at nanostructured ZnO thin films. *Nanotechnology*, 34: 11. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aca910>
- Liu, Z. L., Deng, J. C., Deng, J. J., & Li, F. F. (2008). Fabrication and photocatalysis of CuO/ZnO nano-composites via a new method. *Materials Science and Engineering: B*, 150(2): 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.04.002>
- López, Y., & Scarioni, L. (2016). Optical and electrical properties of CuO films. In *Revista Ingeniería UC*, 23: 290-296.
- Low, J., Yu, J., Jaroniec, M., Wageh, S., & Al-Ghamdi, A. A. (2017). Heterojunction Photocatalysts. In *Advanced Materials* (Vol. 29, Issue 20). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adma.201601694>
- Lv, J., Gong, W., Huang, K., Zhu, J., Meng, F., Song, X., & Sun, Z. (2011). Effect of annealing temperature on photocatalytic activity of ZnO thin films prepared by sol-gel method. *Superlattices and Microstructures*, 50(2): 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2011.05.003>

- Madiha, Z., Radouane, D., Bouras, D., & Boudjema, B. (2023). Photocatalytic Degradation of Orange II by Active Layers of Ag-Doped CuO Deposited by Spin-Coating Method. *Journal of Nano Research*, 80: 1–19.
- Nazar Elamin, & Ammar Elsanousi. (2013). Synthesis of zno nanostructures and their photocatalytic activity. *Journal of Applied and Industrial Science*, 1: 32-35.
- Oliveira, M. C., Fonseca, V. S., Andrade Neto, N. F., Ribeiro, R. A. P., Longo, E., de Lazaro, S. R., Motta, F. V., & Bomio, M. R. D. (2020). Connecting theory with experiment to understand the photocatalytic activity of CuO–ZnO heterostructure. *Ceramics International*, 46(7): 9446–9454. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.205>
- Ong, C. B., Ng, L. Y., & Mohammad, A. W. (2018). A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 536–551. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>
- Pal, S., Maiti, S., Narayan Maiti, U., & Chattopadhyay, K. K. (n.d.). Low temperature solution processed ZnO/CuO heterojunction photocatalyst for visible light induced photo-degradation of organic pollutants. *CrystEngComm*. 17: 1464-1476.
- Pedaneekar, R. S., Shaikh, S. K., & Rajpure, K. Y. (2020). Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review. In *Current Applied Physics*. 20: 931–952. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.04.006>
- Raha, S., & Ahmaruzzaman, M. (2022). ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Advances*, 4: 1868–1925. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1na00880c>
- Raizada, P., Sudhaik, A., & Singh, P. (2019). Photocatalytic water decontamination using graphene and ZnO coupled photocatalysts: A review. In *Materials Science for Energy Technologies*, 2: 509–525. KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.04.007>
- Sahu, K., Choudhary, S., Khan, S. A., Pandey, A., & Mohapatra, S. (2019). Thermal evolution of morphological, structural, optical and photocatalytic properties of CuO thin films. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 17: 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2018.12.005>
- Singh, J., Manna, A. K., & Soni, R. K. (2020). Sunlight driven photocatalysis and non-enzymatic glucose sensing performance of cubic structured CuO thin films. *Applied Surface Science*, 530: 147258. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147258>
- Tounsi, N., Barhoumi, A., Chaffar Akkari, F., Kanzari, M., Guermazi, H., & Guermazi, S. (2015). Structural and optical characterization of copper oxide composite thin films elaborated by GLAD technique. *Vacuum*, 121: 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.07.011>



- Wojtasik, K., Zięba, M., Tyszkiewicz, C., Pakieła, W., Żak, G., Jeremiasz, O., Gondek, E., Drabczyk, K., & Karasiński, P. (2023). Zinc Oxide Films Fabricated via Sol-Gel Method and Dip-Coating Technique—Effect of Sol Aging on Optical Properties, Morphology and Photocatalytic Activity. *Materials*, 16: 1898. <https://doi.org/10.3390/ma16051898>
- Xia, Y., Wang, J., Chen, R., Zhou, D., & Xiang, L. (2016). A review on the fabrication of hierarchical zno nanostructures for photocatalysis application. In *Crystals*, 6: 148. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst6110148>
- Xu, L., Su, J., Zheng, G., & Zhang, L. (2019). Enhanced photocatalytic performance of porous ZnO thin films by CuO nanoparticles surface modification. *Materials Science and Engineering: B*, 248: 114405. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114405>