

El uso de radiación de microondas para la síntesis de Nanopartículas

SEGURA-DE JESÚS, Yara*† y CARBAJAL-FRANCO, Guillermo

Intituto Tecnológico de Toluca

Recibido 11 de Abril, 2017; Aceptado 16 de Junio, 2017

Resumen

Recientemente se ha incrementado el uso de microondas para la obtención de nanopartículas. Algunos métodos usan la radiación de microondas para la evaporación de sustancias químicas, para calentar coloides a altas temperaturas, como fuente de energía para el crecimiento de semillas y para pirólisis asistida. La radiación con microondas se ha usado en otras aplicaciones para obtener sulfuros, nitratos y el crecimiento de cristales de diferentes materiales. Existen algunas publicaciones que reportan el uso de microondas para la obtención de óxidos metálicos mediante la evaporación de metales con bajo punto de fusión, a presión atmosférica y usando un crisol como agente susceptor. La radiación con microondas presenta numerables ventajas comparado con otros procesos, ya que las nanopartículas se pueden obtener en un corto tiempo de depósito y a un bajo costo. En este trabajo se presenta una revisión del uso de la energía de radiación de microondas para la obtención de nanopartículas. Se presentan y comparan las técnicas más comunes: reacciones en autoclave, evaporación de soluciones químicas y calentamiento a alta temperatura usando un material susceptor; con la finalidad de encontrar las diferencias que hacen única cada una de las técnicas.

Método de microondas, nanopartículas, radiación

Abstract

In the last years, the use of microwave electromagnetic radiation has been widely used as new path to synthesize nanomaterials. Many of these methods use the microwave irradiation-heating technique to evaporate chemical preparations, to heat aqueous colloidal suspensions at high pressures, as a source of energy for seed growing, and as an assisted pyrolysis technique. Currently, the microwave radiation method has been used for many applications to obtain sulphides, nitrates and the crystal growth of other materials. There are also some publications dealing with the use of microwave radiation for the synthesis of metallic oxides, by the evaporation of a metal with a low fusion temperature at standard atmosphere conditions; using a crucible based on a susceptor material. The microwave irradiation has some advantage over other process; in this regard, nanoparticles can be obtained in a short deposition time with a reduced cost due to the inexpensive equipment. In this paper, a review of the use of microwave radiation as an energy source for nanoparticles synthesis is presented. The most common techniques such as autoclaved reactions, chemical solution-evaporation and high temperature heating based on a susceptor material are analysed and compared, finding the main differences that make each approach unique

Microwave method, nanoparticles, radiation

Citación: SEGURA-DE JESÚS, Yara y CARBAJAL-FRANCO, Guillermo. El uso de radiación de microondas para la síntesis de Nanopartículas. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-2:46-56

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ysegurad@toluca.tecnm.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

En las últimas décadas, poder obtener y lograr manipular la materia a escala nanométrica ha sido de gran interés para los investigadores debido a que los nanomateriales tienen cambios considerables, como son la pérdida de propiedades ferroeléctricas y ferromagnéticas, cambio en sus propiedades eléctricas y catalíticas, disminución del punto de fusión y una gran relación superficie-volumen (Almendárez & González, 2011; Guozhong Cao, 2004; Lu, 2013).

Una forma de clasificar los métodos de obtención que se han usado para la obtención de nanopartículas son los llamados de “Arriba-abajo” y de “Abajo a arriba” (Bozon et al., 2009; Guozhong Cao, 2004; Zanella, 2012).

Los métodos de arriba-abajo y de abajo-arriba se pueden clasificar además en procesos físicos y químicos. Dentro de los procesos químicos se encuentran los de fase líquida como los de precipitación, sol-gel (Fuentes, Vazquez, & Vazquez, 2016; Gao et al., 2010; Vargas-Hernández, Barrón-Baza, García-Garcilazo, & Soriano-Silverio, 2016) y los hidrotermales (Guangxia Cao et al., 2016; Komarneni, Roy, & Li, 1992); y en su fase gaseosa se encuentran generalmente los procesos de hidrólisis (Akhter et al., 2017; Guangxia Cao et al., 2016; Zhu et al., 2002). Asimismo, están los procesos físicos como el de molienda, deposición física a través de vapor (plasma) y el calentamiento con microondas (Lin Wang, 2003; Wang et al., 2002).

El uso de microondas es una técnica innovadora que permite la obtención de nanopartículas en un corto tiempo (Baghurst & Mingos, 1988; Guo, Zhan, & Zhou, 2009; Komarneni et al., 1992; Kruis, Fissan, & Peled, 1998; Lü et al., 2011; Panneerselvam & Rao, 2003; Serrano, Cavazos, Peña, & Gómez, 2014; Yu & Dutta, 2011). En la última década se ha incrementado su uso debido a que ha sido útil para la sinterización de materiales, vulcanización de polímeros, química sintética, catálisis (Bond, Moyes, & Whan, 1993; Schmink & Leadbeater, 2011) y el procesamiento de materiales inorgánicos. Además, permite reducir el tiempo del calentamiento de materiales, debido a la ausencia de inercia dentro del horno, y ahorro de energía (Cherradi et al., 1998; Oghbaei & Mirzaee, 2010; K. I. Rybakov et al., 2006). Entre los primeros experimentos que se realizaron para la síntesis por microondas, se encuentran la síntesis de cerámica mediante el uso de microondas, utilizando materiales que presenten pérdidas dieléctricas lo suficientemente bajas; que aseguraran el calentamiento volumétrico (K. I. Rybakov et al., 2006; Spatz, 1995).

En 1971 se propuso por primera vez el uso de un horno de microondas, pero fue en 1986 cuando se usó por primera vez un microondas convencional para calentar reacciones orgánicas en solución (Gedye et al., 1986).

La radiación de microondas ha sido usada para la evaporación de soluciones químicas (Akhter et al., 2017; Hariharan et al., 2016; Ikuma, Oosawa, Shimada, & Kamiya, 2004; Lü et al., 2011; Zhu et al., 2002), para el calentamiento de coloides a altas temperaturas (Serrano et al., 2014; Zhong, Wang, Chen, & Liu, 2011), para pirólisis asistida (Miura et al., 2004; Zhang et al., 2016), y usando un agente susceptor (Rashidzadeh, Carbajal-Franco, & Tiburcio-Silver, 2015, 2016).

Calentamiento por microondas

Se conoce como microondas a las ondas electromagnéticas con frecuencias entre 300MHz y 300GHz (Bhattacharya & Basak, 2016; Oghbaei & Mirzaee, 2010; Schmink & Leadbeater, 2011).

Las microondas se caracterizan por tener una serie de propiedades que hacen que la síntesis sea más rápida y energéticamente eficiente. Su radiación permite un calentamiento selectivo de compuestos en una mezcla, con aceleración de velocidad de reacción durante la transferencia de energía electromagnética a térmica (Kirill I. Rybakov, Olevsky, & Krikun, 2013).

Sin embargo, la síntesis de materiales asistida por microondas, requiere un amplio conocimiento acerca de los cambios que los materiales puedan sufrir durante este proceso como son su forma, tamaño, estructura molecular, energía superficial, punto de fusión y sus propiedades ópticas por citar algunas (Cherradi et al., 1998; Gedye et al., 1986).

Ahora bien, la transmisión de energía electromagnética reduce la transferencia de calor por conducción térmica; entonces, la capacidad de calentar materiales está basada en la interacción de las moléculas con un campo electromagnético capaz de llegar al centro del material, generando así calor desde su interior (Bhattacharya & Basak, 2016; Kitchen et al., 2014; Oghbaei & Mirzaee, 2010).

De igual manera, la calefacción por microondas se ha convertido en un método importante durante el proceso de materiales, ya que permite un control óptimo de la velocidad de transferencia de calor en un reactor microestructurado eliminando las resistencias de transporte térmico (Gao et al., 2010).

La generación interna de calor que produce el horno de microondas en los materiales presenta algunos beneficios, comparado con los hornos convencionales. La radiación de microondas interactúa directamente con los componentes de reacción, lo que da como resultado una transferencia muy rápida de energía y conduce a aumentos rápidos de temperatura (Kitchen et al., 2014).

La calefacción por microondas se produce internamente, desde el centro del material generando calor dentro de la muestra; en la medida en que un material responde a los campos eléctricos y magnéticos alternos del microondas, como se muestra en la Fig. 1 (Bhattacharya & Basak, 2016; Miura et al., 2004).

Además, el método de calentamiento durante la síntesis modifica las propiedades finales, el tamaño y la forma del material. Asimismo, una de las propiedades que influye fuertemente en el método de calentamiento son sus características ópticas y la fotoluminiscencia, esta última, debido a cambios en los defectos superficiales del material que pueden actuar como rutas de escape (Serrano et al., 2014).

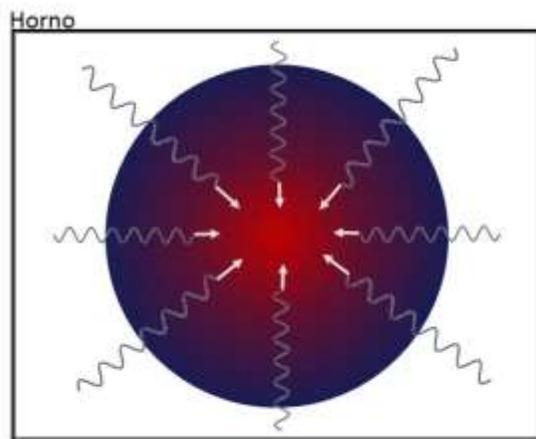


Figura 1 Calentamiento de microondas

Fuente: (Bhattacharya & Basak, 2016)

Por otra parte y sabiendo que la constante dieléctrica determina la capacidad de un material para almacenar energía electromagnética, mientras que la pérdida dieléctrica determina la capacidad del material para convertir la energía eléctrica en calor, es posible determinar los tipos y la cantidad de materiales que puedan exponerse a la radiación de microondas (Bhattacharya & Basak, 2016).

El susceptor como auxiliar para el calentamiento con microondas

No todos los materiales pueden ser calentados por microondas, es por esto que se usa un susceptor.

Un susceptor es un material que transforma la energía electromagnética en térmica (Chen, Warning, Datta, & Chen, 2017; Labuza & Meister, 1992). El susceptor en conjunto con el microondas aceleran el proceso de calentamiento al ser de forma bidireccional (de adentro hacia afuera por parte del microondas y de afuera hacia adentro del material por parte del susceptor) con pérdidas de calor reducidas en la superficie del material (Kitchen et al., 2014; Suriapparao & Vinu, 2015).

Al calentamiento asistido con un material susceptor se le conoce como calentamiento híbrido (Lasri, Ramesh, & Schächter, 2000; Menezes, Souto, & Kiminami, 2007; Ramesh, Brandon, & Schächter, 1999; Zhao et al., 2000). Cuando un susceptor es calentado por la radiación del microondas, el calor es transferido a la muestra desde la parte superficial (Fig. 2).

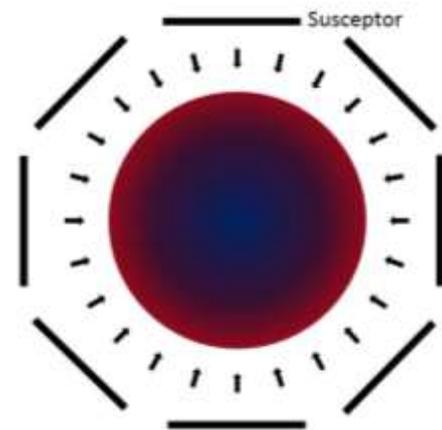


Figura 2 Calentamiento auxiliado por un material susceptor. (Fuente: Bhattacharya & Basak, 2016)

Debido a la unión del microondas y el agente susceptor la temperatura de la muestra puede llegar a su punto fusión (Fig.3). (Bhattacharya & Basak, 2016).

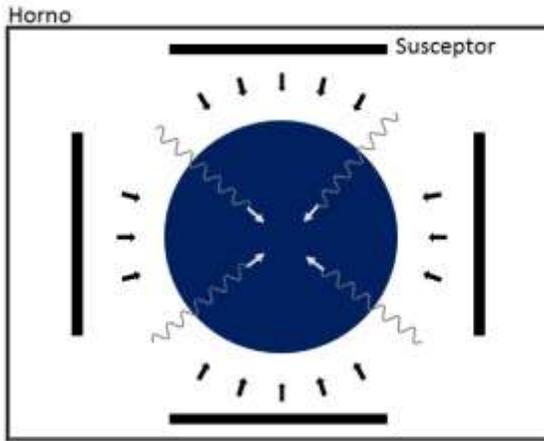


Figura 3 a) Transferencia de energía electromagnética hacia la muestra. Fuente: (Bhattacharya & Basak, 2016)

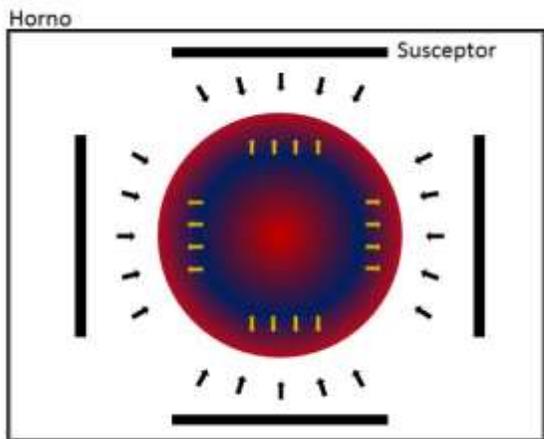


Figura 4 b) Calentamiento híbrido. Fuente: (Bhattacharya & Basak, 2016; Oghbaei & Mirzaee, 2010)

Por esta razón algunos investigadores han introducido los susceptores como auxiliar para elevar la temperatura de algunos materiales de una manera más rápida (Alford, Gadre, Vemuri, & Theodore, 2012; Dbowski, 2017; Suriapparao & Vinu, 2015; Vargas, Pantoya, Saed, & Weeks, 2016).

En 1999, Kuo Chung Lee et al., estudiaron el efecto del susceptor modelando anillos de Si concéntricos con diferentes diámetros colocados sobre un plano de cuarzo para mejorar el espesor de óxidos en un sistema RTP (procesamiento térmico rápido) de temperatura no uniforme. El método de utilizar anillos de Si separados como un susceptor mejora el espesor de los óxidos en sistemas RTP.

En el 2015, Suriapparao & Vinu, presentaron varios experimentos diseñados para comprender los defectos de potencia de microondas en diferentes susceptores en forma de polvo como el grafito, carbón activado, aluminio, carburo de silicio, lignina y cenizas volantes para evaluar y optimizar la composición del producto, para la recuperación de polímeros sintéticos. Al final del estudio clasificaron los susceptores basados en su velocidad de calentamiento, demostrando que al optimizar los parámetros de reacción se pudo obtener aceite a partir de plásticos de desecho por pirólisis asistida por microondas.

En el 2017, Marcin Antoni Dbowski, centró su estudio en el recubrimiento aplicado sobre policarbonato y sustratos de polimetilmetacrilatos, usando susceptores que contienen aluminio, materiales basados en carbono y carburo de silicio entre otros. Así como Dbowski, otros investigadores como Alford utilizan el carburo de silicio como agente susceptor, quien demostró que estos son una alternativa viable al calentamiento primario por microondas, especialmente en materiales que no absorben eficazmente la energía de microondas a temperaturas más bajas como es el silicio, en donde la temperatura en sus experimentos, oscilaba entre 620 y 720 °C (Alford et al., 2012; Dbowski, 2017). Sin embargo, el uso de un susceptor puede causar contaminación en los productos y la generación de plasma.

No obstante, el plasma inducido con microondas se ha utilizado eficazmente como un reemplazo para un susceptor, ya que el plasma transfiere energía entre la radiación del microondas y los reactivos, permitiendo que cualquier sólido pueda ser calentado (Kitchen et al., 2014). Aunque la formación de plasma puede ser indeseable en algunos casos, ya que interrumpe temporalmente el proceso además de infligir cambios abruptos en los patrones de calentamiento.

Resultados

El calentamiento por microondas ha tenido mayor relevancia para los investigadores en los últimos años, principalmente durante la obtención de materiales.

En 2010, Pengzhao Gao et al., sintetizaron películas finas de ferrita con diversos tamaños de grano sobre sustratos de silicio policristalino por el método de sol-gel, posteriormente calcinaron en un horno de microondas a una temperatura de 600 a 800 °C de 1 a 3 horas, dando como resultado del tratamiento térmico el aumento del tamaño de grano de 12 a 27 nm.

En 2011, Hailiang Lü et al., prepararon cristales de Cromito de Magnesio dopados con CO₂ utilizando una solución acuosa preparada con nitrato de magnesio y cromo, que posteriormente se sintetizó en un horno de microondas durante aproximadamente 20 minutos con una energía de microonda de 600W y una agitación de 750 rpm, formando un gel orgánico viscoso. Este método no requirió ningún proceso adicional de separación o enjuague.

En el 2014, T. Serrano et al., presentan resultados de la síntesis de un sistema coloidal comparado con el método de microondas, donde el Sulfuro de Plomo actuó como núcleo envuelto en sulfuro de zinc. En el caso del sistema coloidal, las nanopartículas obtenidas se mantuvieron en condiciones de reflujo durante 6 horas, mientras que las nanopartículas sintetizadas por el método de microondas se obtuvieron durante diferentes ciclos sometidos a la radiación con microondas dentro del horno, en ciclos de apagado/encendido con tiempos de calentamiento de 60 s, ajustando el pH de la solución a 7.0 con NaOH. Ambas muestras se centrifugaron, se lavaron con acetona y acetonitrilo, y luego se dispersaron nuevamente en agua para su caracterización.

En el 2016, V. Hariharan et al., analizaron el comportamiento magnético y electroquímico de nanomateriales de óxido de tungsteno dopado con cobalto, utilizando la irradiación directa del microondas a temperatura ambiente. Una solución de ácido volfrámico disuelto en NaOH y una solución de hexafluoruro de cobalto con ácido volfrámico y agua desionizada, dando una agitación por 20 min; posteriormente se transfirió la mezcla al horno de microondas durante 10 min a 180 W, obteniendo un precipitado amarillo, que fue recocido en un horno tubular con el fin de eliminar subproductos no deseados.

En el 2016, Mehrdad Rashidzadeh et al., demostraron una manera de obtener nanopartículas de CdO evaporando hojuelas de Cadmio, utilizando como agente susceptor un crisol que permitió elevar su temperatura hasta su evaporación, para poder ser depositados en un sustrato de vidrio en un tiempo menor a 2 min, obteniendo cubos de CdO de tamaños nanométricos.

Además, existen investigaciones donde se ha utilizado el método de microondas para el crecimiento de nanohilos, como lo hicieron Guangxia Cao et al., en el 2016, al hacer crecer matrices de nanohilos de ZnO por un método hidrotérmal asistido por microondas, sobre sustratos de vidrio de óxido de estaño dopado con flúor. Este proceso de calentamiento por microondas se realizó durante 5 horas a 640 W para hacer crecer las matrices de nanohilos de ZnO con diferentes longitudes. Durante el crecimiento, las soluciones precursoras se inyectaron continuamente en el reactor a un caudal de 7 ml/min.

Recientemente en 2017, Akshter Hashi et al., fabricaron de un sensor de hidracina a base de nanopartículas magnéticas de Fe₂O₃ recubiertas con silicio, obtenidas por un método de irradiación de microondas. El calentamiento homogéneo producido por la irradiación fue la clave para lograr el revestimiento efectivo y uniforme de las nanopartículas.

Conclusiones

El microondas se ha usado para la síntesis de materiales a escalas pequeñas, el crecimiento de nanohilos incluso la obtención de plasma, debido al aumento instantáneo de temperatura al exponer soluciones, sales, hojuelas o películas de algunos materiales a su radiación.

Dentro de sus usos se encuentran la síntesis de nanopartículas por métodos físicos y químicos, así como el crecimiento de matrices de nanohilos. Algunos investigadores han usado agentes susceptores para incrementar la temperatura en caso de que el material a calentar tenga un punto de fusión elevado o que el tiempo de exposición a las ondas electromagnéticas sea insuficiente para llegar al punto de fusión.

Es cierto que el método de microondas ofrece ventajas sobre otros métodos, como son el tiempo de depósito, trabajo a presión atmosférica y suele ser más barato incluso se puede observar la presencia de plasma. Sin embargo, existen materiales que, debido a las características y punto de fusión elevados, no serían posibles sintetizarlos usando solamente un horno de microondas, por lo que se requiere ayuda de un agente susceptor. No obstante, la presencia de susceptores puede contaminar una muestra si el material del susceptor presenta un punto de fusión más bajo que el material a calentar.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Tecnológico de Toluca, por su apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Akhter, H., Murshed, J., Rashed, M. A., Oshima, Y., Nagao, Y., Rahman, M. M., Asiri, A. M., Hasnat, M. A., Uddin, M. N., & Siddiquey, I. A. (2017). Fabrication of hydrazine sensor based on silica-coated Fe₂O₃ magnetic nanoparticles prepared by a rapid microwave irradiation method. *Journal of Alloys and Compounds*, 698, 921–929.
- Alford, T. L., Gadre, M. J., Vemuri, R. N. P., & Theodore, N. D. (2012). Susceptor-assisted microwave annealing for activation of arsenic dopants in silicon. *Thin Solid Films*, 520, 4314–4320.
- Almendárez, A., & González, J. A. (2011). Nanomateriales: su crecimiento, caracterización estructural y tendencias. *Ide@s CONCYTEG*, 6(72), 772–787.

- Baghurst, D. R., & Mingos, D. M. P. (1988). Application of microwave heating techniques for the synthesis of solid state inorganic compounds. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, (12), 829–830.
- Bhattacharya, M., & Basak, T. (2016). A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. *Energy*, 97, 306–338.
- Bond, G., Moyes, R. B., & Whan, D. A. (1993). Recent applications of microwave heating in catalysis. *Catalysis Today*, 17(3), 427–437.
- Bozon, F., Fiévet, F., Piquemal, J.-Y., Brayner, R., El Kabouss, K., & Soumare, Y. (2009). Nanoparticles of metal and metal oxides : some peculiar synthesis methods , size and shape control , application to catalysts preparation. *Brazilian Journal of Physics*, 39(1A), 134–140.
- Cao, G. (2004). *Nanostructures & Nanomaterials. Synthesis, Properties & Applications*. London WC2H 9HE: Imperial College Press USA.
- Cao, G., Hong, K., Wang, W., Liu, L., & Xu, M. (2016). Fast growth of well-aligned ZnO nanowire arrays by a microwave heating method and their photocatalytic properties. *Nanotechnology*, 27, 435402–7.
- Chen, F., Warning, A. D., Datta, A. K., & Chen, X. (2017). Susceptors in microwave cavity heating: Modeling and experimentation with a frozen pie. *Journal of Food Engineering*, 195, 191–205.
- Cherradi, A., Marinel, S., Lakhdari, Z., Desgardin, G., Provost, J., & Raveau, B. (1998). A symmetric cavity that saves energy during microwave processing of materials. *Microwave Journal*, 41, 84–94.
- Dbowski, M. A. (2017). Low temperature microwave processing of silicone resin coatings containing microwave susceptors. *Surface & Coatings Technology*, 320, 13–17.
- Fuentes, T., Vazquez, C., & Vazquez, K. (2016). Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO₂. *Revista de Energía Química y Física*, 3, 50–56.
- Gao, P., Rebrov, E. V., Verhoeven, T. M. W. G. M., Schouten, J. C., Kleismit, R., Kozłowski, G., Cetnar, J., Turgut, Z., & Subramanyam, G. (2010). Structural investigations and magnetic properties of sol-gel Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ thin films for microwave heating. *Journal of Applied Physics*, 107, 44317–8.
- Gedye, R., Smith, F., Westaway, K., Ali, H., Baldisera, L., Laberge, L., & Rousell, J. (1986). The use of microwave ovens for rapid organic synthesis. *Tetrahedron Letters*, 27, 279–282.
- Guo, X. F., Zhan, H., & Zhou, Y. H. (2009). Rapid synthesis of LiFePO₄/C composite by microwave method. *Solid State Ionics*, 180(4–5), 386–391.
- Hariharan, V., Aroulmoji, V., Prabakaran, K., Gnanavel, B., & Parthibavarman, M. (2016). Magnetic and electrochemical behaviour of cobalt doped tungsten oxide (WO₃) nanomaterials by microwave irradiation method. *Journal of Alloys and Compounds*, 689, 41–47.
- Ikuma, Y., Oosawa, H., Shimada, E., & Kamiya, M. (2004). Effect of microwave radiation on the formation of Ce₂O(CO₃)₂.H₂O in aqueous solution. *Solid State Ionics*, 151, 347–352.
- Kitchen, H. J., Vallance, S. R., Kennedy, J. L., Tapia-ruiz, N., Carassiti, L., Harrison, A., Whittaker, A. G., Drysdale, T. D., Kingman, S. W., & Gregory, D. H. (2014). Modern Microwave Methods in Solid-State Inorganic

- Materials Chemistry: From Fundamentals to Manufacturing. *Chemical Reviews*, 114, 1170–1206.
- Komarneni, S., Roy, R., & Li, Q. H. (1992). Microwave-hydrothermal synthesis of ceramic powders. *Materials Research Bulletin*, 27(12), 1393–1405.
- Kruis, F. E., Fissan, H., & Peled, A. (1998). Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications—a review. *Journal of Aerosol Science*, 29(5–6), 511–535.
- Labuza, T., & Meister, J. (1992). An alternate method for measuring the heating potential of microwave susceptor films. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 27(4), 2015–208.
- Lasri, J., Ramesh, P. D., & Schächter, L. (2000). Energy conversion during microwave sintering of a multiphase ceramic surrounded by a susceptor. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(6), 1465–1468.
- Lin Wang, Z. (2003). Nanobelts , Nanowires , and Nanodiskettes of Semiconducting Oxides From Materials to Nanodevices **. *Advanced Materials*, 15(5), 432–436.
- Lü, H., Ma, W., Zhao, H., Du, J., & Yu, X. (2011). Synthesis and Characterization of MgCr₂O₄:CO₂₊ Fabricated by a Microwave Method. *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 1233–1235.
- Lu, K. (2013). *Nanoparticles Materials: Synthesis, Characterization and Processing*. New Jersey: Wiley. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Menezes, R. R., Souto, P. M., & Kiminami, R. H. G. A. (2007). Microwave hybrid fast sintering of porcelain bodies. *Journal of Materials Processing Technology*, 190(1–3), 223–229.
- Miura, M., Kaga, H., Sakurai, A., Kakuchi, T., & Takahashi, K. (2004). Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(1), 187–199.
- Oghbaei, M., & Mirzaee, O. (2010). Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 494(1–2), 175–189.
- Panneerselvam, M., & Rao, K. J. (2003). Novel microwave method for the synthesis and sintering of mullite from kaolinite. *Chemistry of Materials*, 15(11), 2247–2252.
- Ramesh, P. D., Brandon, D., & Schächter, L. (1999). Use of partially oxidized SiC particle bed for microwave sintering of low loss ceramics. *Materials Science and Engineering: A*, 266(1–2), 211–220.
- Rashidzadeh, M., Carbajal-Franco, G., & Tiburcio-Silver, A. (2015). Nanoparticulated hydrophobic CdO coatings deposited by microwave procedure. *Micro and Nano Letters*, 10, 653–656.
- Rashidzadeh, M., Carbajal-Franco, G., & Tiburcio-Silver, A. (2016). Hydrophobic Coatings Composed by Cubic-Shaped CdO Nanoparticles Grown by a Novel and Simple Microwave Method. *Journal of Nanoparticles*, 2016, 1–6.

- Rybakov, K. I., Olevsky, E. A., & Krikun, E. V. (2013). Microwave sintering: Fundamentals and modeling. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(4), 1003–1020.
- Rybakov, K. I., Semenov, V. E., Egorov, S. V., Ereemeev, A. G., Plotnikov, I. V., & Bykov, Y. V. (2006). Microwave heating of conductive powder materials. *Journal of Applied Physics*, 99, 1–10.
- Schmink, J., & Leadbeater, N. (2011). *Microwave heating as a tool for sustainable chemistry. Microwave Heating as a Tool for Sustainable Chemistry*.
- Serrano, T., Cavazos, J. L., Peña, Y., & Gómez, I. (2014). Synthesis and Characterization of PbS/ZnS core/Shell Nanoparticles by Microwave Method. *Chalcogenide Letters*, 11, 21–28.
- Spotz, M. S. (1995). Thermal Stability of Ceramic Materials in Microwave Heating. *Journal of the American Ceramics Society*, 78(4), 1041–1048.
- Suriapparao, D. V., & Vinu, R. (2015). Resource recovery from synthetic polymers via microwave pyrolysis using different susceptors. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 701–712.
- Vargas-Hernández, J., Barrón-Baza, G. A., García-Garcilazo, J. E., & Soriano-Silverio, K. (2016). Síntesis de nanopartículas de TiO₂ con alta área superficial para degradación de contaminantes en agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2, 27–32.
- Vargas, E., Pantoya, M. L., Saed, M. A., & Weeks, B. L. (2016). Advanced susceptors for microwave heating of energetic materials. *Materials and Design*, 90, 47–53.
- Wang, Y., Meng, G., Zhang, L., Liang, C., & Zhang, J. (2002). Catalytic Growth of Large-Scale Single-Crystal CdS Nanowires by Physical Evaporation and Their Photoluminescence. *Chemistry Material*, 14(4), 1773–1777.
- Yu, Y. T., & Dutta, P. (2011). Synthesis of Au/SnO₂ coreshell structure nanoparticles by a microwave-assisted method and their optical properties. *Journal of Solid State Chemistry*, 184(2), 312–316.
- Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Www.Mundonano.Unam.Mx*, 5(1), 69–81.
- Zhang, L., Lan, J., Yang, J., Guo, S., Peng, J., Zhang, L., Zhou, C., & Ju, S. (2016). Facile Synthesis of Nanocrystal Tin Oxide Hollow Microspheres by Microwave-assisted Spray Pyrolysis Method. *Journal of Materials Science & Technology*.
- Zhao, C., Vleugels, J., Groffils, C., Luypaert, P. J., & Van Der Biest, O. (2000). Hybrid sintering with a tubular susceptor in a cylindrical single-mode microwave furnace. *Acta Materialia*, 48(14), 3795–3801.
- Zhong, C., Wang, J., Chen, Z., & Liu, H. (2011). SnO₂-Graphene Composite Synthesized via an Ultrafast and Environmentally Friendly Microwave Autoclave Method and Its Use as a Superior Anode for Lithium-Ion Batteries. *The Journal of physical chemistry C*, 115, 25115–25120.

Zhu, J., Zhu, J., Liao, X., Fang, J., & Zhou, M. (2002). Rapid synthesis of nanocrystalline SnO₂ powders by microwave heating method. *Materials Letters*, 53, 12–19.