

Síntesis por radiación con microondas de nanotubos de carbono

Edgar González^{1,2}, Francisco González^{1,3}

¹Grupo de Nanociencia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., Colombia

²Centro de Ciencia y Tecnología Nanoescalar, Bogotá, D.C., Colombia

³Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santafe, Argentina
egonzale@javeriana.edu.co, lfgonzalez@unl.edu.ar

Recibido: 15-07-2007; Aceptado: 29-01-2009

Resumen

Aunque en la actualidad se cuenta con una gran variedad de métodos y técnicas para la síntesis y funcionalización de nanotubos de carbono, aún se hace necesario explorar otras alternativas que permitan mejorar aspectos tales como el calentamiento selectivo y homogéneo de las muestras y la reducción de los tiempos para completar los procesos requeridos. Con radiación por microondas se abre una importante opción para dar cuenta de estos requerimientos, además de proyectarse como un método para la producción de nanotubos de carbono alineados y en multicapas que pueden resultar valiosos para investigación, específicamente en el diseño de biosensores, sistemas de purificación, nanosistemas de emisión catódica, electrodos catalíticos para celdas de combustible, etc. En este trabajo se realiza una revisión del uso de radiación por microondas para la producción y funcionalización de nanotubos de carbono y se reporta la síntesis de nanotubos de carbono por microondas con el uso de nitrato de plata como catalizador.

Palabras clave: nanotecnología, nanotubos de carbono, microondas, síntesis.

Abstract

Synthesis of carbon nanotubes by microwave radiation. Although at the present time a variety of methods and techniques is available for the synthesis and functionalization of carbon nanotubes, it is necessary to explore alternatives to improve the selective and homogeneous heating of the samples and to reduce the times to complete the processes. Microwave radiation offers an important opportunity to fulfil these requirements, besides representing a method for the production of aligned carbon nanotubes in multi-layers that can be valuable for investigation, specifically in the biosensors design, purification systems, nanosystems of cathodic emission, catalytic electrodes for fuel cells, etc. We carried out a review of the use of microwave radiation for the production and functionalization of carbon nanotubes and report the synthesis of carbon nanotubes by microwaves with the use of silver nitrate as the catalyzer.

Key words: carbon nanotubes, nanotechnology, microwave, synthesis.

Resumo

Síntese por radiação com microondas de nanotubos de carbono. Embora atualmente, há uma grande variedade de métodos e técnicas para a síntese e funcionamento de nanotubos de carbono, ainda é necessário explorar alternativas que permitam melhorar aspectos como o aquecimento seletivo e homogêneo das amostras e a redução dos tempos para completar os processos requeridos. Com a radiação por microondas abre-se uma importante opção para dar conta destes requerimentos, além de projetar-se como um método para a produção de nanotubos de carbono alinhados e em multicapas que podem resultar valiosos para a pesquisa, especificamente no desenho de biosensores, sistemas de purificação, nanosistemas de emissão catódica, eletrodos catalíticos para celdas de combustível, etc. Nesta pesquisa realiza-se uma revisão do uso de radiação por microondas para a produção e funcionamento de nanotubos de carbono e reporta-se a síntese de nanotubos de carbono por microondas com o uso de nitrato de prata como catalisador.

Palavras chave: nanotecnologia, nanotubos de carbono, microondas, síntese.

INTRODUCCIÓN

Las nanoestructuras de carbono, entre las que se destacan los nanotubos y fullerenos se sintetizan por diversos métodos, de los cuales, la producción por ablación láser (Kroto *et al.*, 1985; Guo *et al.*, 1995; Moravsky *et al.*, 2005), descarga de arco (Ebbesen *et al.*, 1992; Ebbesen *et al.*, 1993; Harris, 1999; Ando *et al.*, 2000; Busnaina, 2007) y

deposición química por vapor (Charlier *et al.*, 2001; Cheung *et al.*, 2002; Min *et al.*, 2005; Meyyappan, 2005) resultan ser los más importantes. Debido a las altas temperaturas en el proceso de crecimiento, los nanotubos de carbono producidos por ablación láser y descarga de arco presentan menor cantidad de defectos estructurales si se comparan con otros métodos existentes. Aunque se hace posible mejorar la calidad de los nanotubos de carbono

Tabla 1. Propiedades de los nanotubos sintetizados por tres métodos

	Descripción	Producto	Ventajas	Desventajas
Ablación Láser	Condensación de átomos de carbono producidos por la evaporación a temperaturas entre 3000 y 4000 °C de un precursor sólido tal como el grafito. La fuente de energía es un láser de alta potencia.	NCPS*: longitudes del orden de los 5-20 micrones y diámetros del orden de 1-2 nm. NCPM*: Longitudes del orden de los 300 nm, con un número entre 4-24 capas y diámetros internos entre 1,5-3nm	Para NCPS se hace posible controlar el diámetro. Los nanotubos presentan pocos defectos.	Método costoso ya que requiere un láser de alta potencia.
Descarga de Arco	Condensación de átomos de carbono producidos por evaporación de grafito haciendo uso de una descarga eléctrica entre dos electrodos de grafito.	NCPS: Tubos cortos con diámetros entre 0.6 y 1,4 nm. Se requiere catalítico metálico. NCPM: Tubos cortos con diámetros internos entre 1 y 3 nm y diámetros externos del orden de los 10 nm.	Pocos defectos estructurales para los NCPS. Para NCPM no se requieren catalíticos en el precursor. Es un método económico.	No puede ser controladas las dimensiones del nanotubo. Resultan tubos muy cortos y crecen de manera desordenada en todas direcciones.
Deposición Química por Vapor	Descomposición de un vapor o gas precursor que contiene átomos de carbono (hidrocarburo) en la presencia de un catalizador metálico sobre un sustrato.	NCPS: tubos largos con diámetros entre 0,6 y 4 nm. NCPM: tubos largos con diámetros entre 10-240 nm.	Es un método simple y económico para producción a escala industrial de tubos de carbono. Se hace posible controlar el diámetro de NCPS. Se pueden producir tubos alineados verticalmente.	Los tubos suelen ser de pared múltiple y con defectos estructurales.

* NCPS: Nanotubos de Carbono de Pared Simple

* NCPM: Nanotubos de Carbono de Pared Compuesta

sintetizados por métodos en los que la temperatura de operación esté por debajo de los 2000 K, algunas de sus propiedades físicas no logran superar las obtenidas por descarga de arco y ablación, específicamente en nanotubos de carbono de pared múltiple (Moravsky *et al.*, 2005). En nanotubos de carbono de pared simple, la limitada existencia de defectos resulta independiente del método de producción, condición que ha favorecido la búsqueda de caminos alternativos que permitan investigar la distribución de longitudes, quiralidad y facilidades en la tarea de purificación, aspectos que aún se evalúan en función del método de producción. Se reconoce en la comunidad científica la necesidad de mantener e incrementar estudios teóricos y experimentales orientados en esta dirección. La tabla 1 muestra las ventajas, desventajas, calidad y tamaño de los nanotubos de carbono sintetizados por los tres métodos mencionados.

El empleo de microondas para síntesis de nanotubos de carbono en donde la energía suministrada por el campo electromagnético de la onda es entregada al material a través de interacciones de tipo molecular, ofrece un amplio número de ventajas entre las que se destacan: un calentamiento selectivo, uniforme y volumétrico, además de la gran rapidez con la cual se hace posible suministrar la energía térmica (Hill y Marchant, 1996). Estos aspectos colocan el uso de las microondas en un lugar de gran importancia en los escenarios de desarrollo de procesos de síntesis y funcionalización de nanomateriales.

Calentamiento de materiales por microondas

En los procesos de síntesis de nanoestructuras, funcionalización y purificación asistida con microondas, interesa identificar el comportamiento térmico que experimentan los materiales involucrados en el proceso, aspecto que proporciona criterios suficientes para hacer o no uso de un determinado compuesto o sustancia. Desde un punto de vista macroscópico, las investigaciones en fenomenología de transporte térmico y calentamiento se encuentran basadas en aproximaciones formales que no pueden ser aplicadas para sistemas nanoescalares.

Los materiales respecto a su interacción con la radiación en el espectro de las microondas pueden ser clasificados en tres grupos: reflectivos, transmisores y absorbentes (Gómez y Aguilar, 2005). Al primer grupo pertenecen los metales (con dominio de volumen sobre superficie —materiales tipo *bulk*—) y cierto tipo de aleaciones, los cuales no pueden ser calentados por radiación en el espectro de las microondas debido a la escasa penetración que experimentan las ondas electromagnéticas a causa del dominio de las corrientes de conducción sobre las de desplazamiento.

Cuando se trata de polvos metálicos, el dominio de superficie de las partículas sobre el volumen hace que se produzcan calentamientos un poco mayores. Sin que aún se tenga una clara comprensión del proceso de interacción de la microonda con partículas metálicas, se han realizado aproximaciones formales al problema a partir de modelos térmico-electromagnéticos (solución de las ecuaciones de Maxwell en forma simultánea con la ecuación de transferencia térmica) (Mishra *et al.*, 2006) los cuales permiten realizar predicciones de variación de temperatura con el tiempo y la evaluación del efecto del tamaño de las partículas sobre la rata de calentamiento. De otra parte se ha verificado que metales líquidos son principalmente reflectores de microondas (Sun *et al.*, 2005).

Los materiales *transmisores* resultan transparentes a la radiación en el espectro de las microondas. Se pueden mencionar entre otros: el cuarzo, una gran variedad de vidrios, cerámicas —sin presencia de elementos de transición— y teflón, entre otros. Materiales de este tipo pueden ser empleados para fabricar recipientes útiles en tareas de síntesis y reacciones químicas asistidas por microondas.

Los materiales *absorbentes* capturan la energía electromagnética y en consecuencia experimentan un rápido calentamiento. Son diversas las aproximaciones y modelos físicos para estudiar y explicar el calentamiento en materiales absorbentes: rotación bipolar, calentamiento dieléctrico, calentamiento resistivo y calentamiento electromagnético.

Los dieléctricos son materiales que pueden ser polarizados por la acción de un campo eléctrico externo, el cual produce por inducción (para materiales no polares) o rotación (para materiales polares) alineación masiva de dipolos moleculares. Las moléculas bajo la acción del campo electromagnético experimentan rotaciones que tienden a alinear los momentos bipolares en dirección al incremento del campo de la onda y en consecuencia generar calor debido a la “fricción molecular” —modelo de Debye—.

Para el carbón, el calentamiento por microondas se produce por el denominado *efecto Maxwell-Wagner*, el cual lo generan electrones libres con desplazamiento restringido por planos basales que para campos electromagnéticos externos, la reorientación inducida de los electrones produce el calentamiento del material. Este comportamiento térmico permite que el grafito sometido a radiación en el espectro de las microondas, pueda ser calentado para procesos de síntesis de nanotubos de carbono. La frecuencia adecuada para el calentamiento del grafito como material precursor es de 2,45 GHz. Aunque aún se desconoce en detalle la naturaleza y mecanismos de interacción entre las

microondas y materiales precursores como el grafito para la obtención de los nanotubos de carbono (aspecto que requiere ser investigado), se acepta que la transferencia de energía se da a partir de fenómenos de resonancia.

Síntesis de nanoestructuras por microondas

El uso de radiación en el espectro de las microondas como herramienta térmica para la síntesis orgánica ha jugado un papel fundamental en los últimos años debido a sus considerables ventajas frente a métodos convencionales. Así, la fullenerización de policarbonato que da lugar a un polímero de gran importancia comercial debido a las propiedades ópticas que lo caracterizan, puede ser obtenida con la reacción directa del C_{60} con policarbonato en presencia de azo-bis-isobutironitrilo con el uso de 1,1,2,2-tetracloroetano como solvente bajo radiación de microondas. De otra parte, bajo radiación de microondas y condición de solvente libre se produce el derivado (60) fulleropirrolidina vía ciclo-adición bipolar [2 + 3], método que resulta ventajoso comparado con los métodos convencionales de calentamiento. El número de publicaciones sobre síntesis orgánica asistida con microondas se ha incrementado exponencialmente en los últimos años, en contraste con el escaso interés y uso de este método en la época en que se reportaron resultados por primera vez (Gedye *et al.*, 1986; Loupy, 2002; Lipstrom *et al.*, 2004, Kappe *et al.*, 2005). Una gran mayoría de los experimentos pioneros se realizaron con una infraestructura modesta, que incluía el uso de hornos microondas domésticos adaptados para la realización de las pruebas correspondientes. En la actualidad, se ha desarrollado una instrumentación refinada y de gran precisión para síntesis química con microondas con el consecuente desplazamiento progresivo de los métodos usuales de calentamiento en el campo de la práctica académica y la producción industrial.

Un primer paso significativo en la producción de nanoestructuras de carbono por microondas se reportó en 1995 con las investigaciones de Ikeda T., Kamo T. y Danno M., quienes lograron producir fullerenos a partir de un plasma de naftalina-nitrógeno a presión atmosférica con el uso de una cavidad coaxial cilíndrica (Ikeda *et al.*, 1995). Cuatro años más tarde, se reportó la síntesis con microondas de fullerenos a partir de cloroformo.

Recientemente se han desarrollado técnicas de deposición química de vapor mejorado de plasma excitado con microondas para producir nanotubos de carbono y nanofibras alineados verticalmente (Bower *et al.*, 2000; Dai, 2001), totalmente diferente a las técnicas de producción vertical y horizontal en horno. Las deposiciones de plasma resultan muy estables, controlables y reproducibles,

además de conducir a una producción de estructuras alineadas verticalmente a bajas temperaturas. Ya se han reportado significativos avances en la síntesis de nuevas entidades, entre las que se destacan la preparación bajo un plasma de una mezcla de metano, hidrógeno y nitrógeno a $720^{\circ}C$ de una red autoorganizada de carbono totalmente novedosa y diferente a las conocidas nanofibras o cables de nanotubos de carbono. Se trata de una red de carbono con una longitud que supera los 10 micrómetros y un diámetro del orden del micrómetro, compuesta de una gran cantidad de nanotubos de carbono con diámetros comprendidos entre 20 nm y 100 nm (Matsushita *et al.*, 2004). Con el uso de moléculas biológicas como catalizadores, Yoshimura, Tanaka y Ueda han producido nanoestructuras de carbono por deposición química de vapor de plasma excitado con microondas (Yoshimura *et al.*, 2005). Sobre un sustrato de níquel y el uso de 20% de CH_4 y 80% de H_2 a presión de 50 torr se han obtenido nanotubos de carbono de pared múltiple y nanofibras con excelentes propiedades mecánicas (Belay *et al.*, 2003). Igualmente, con la asistencia de metano e hidrógeno sobre un sustrato de níquel se ha logrado crecimiento de nanotubos de carbono a bajas temperaturas ($520\text{-}700^{\circ}C$) (Chul *et al.*, 2000) y a partir de grafito y el uso de CH_4 y H_2 se han sintetizado nanofibras de carbono en forma de conos compuestos de láminas de grafito puro y puntas de longitudes del orden de los nanómetros. O. Kharissova y su grupo, con montajes experimentales simples, han producido por microondas nanotubos de carbono alineados verticalmente, aprovechando la capacidad del grafito para absorber microondas sin calentamiento previo (Kharissova, 2004; Mendez *et al.*, 2003).

Una estrategia de gran impacto en las tecnologías nanoelectrónicas es la síntesis directa de nanotubos de carbono sobre sustratos flexibles, la cual ha sido generalmente realizada por el método de deposición química de vapor, técnica que presenta limitaciones para la obtención de nanotubos de alta calidad con polímeros. En (Hong *et al.*, 2002) se propone una nueva alternativa de síntesis sobre sustratos de polímeros orgánicos haciendo uso de calentamiento de catalizadores por microondas. Con esta técnica se hace posible llevar la producción de arreglos de nanotubos a una fase de gran aplicabilidad tecnológica, específicamente en la producción de sistemas de emisión de campo (Yoon, 2005).

Funcionalización de nanotubos de carbono asistida con microondas

La funcionalización de nanotubos de carbono con la asistencia de microondas, se proyecta como una alternativa favorable para atender las necesidades impuestas por la

naciente era de la nanociencia y nanotecnología. En las tareas de solubilización e investigación de interacción controlada de los nanotubos de carbono con otras entidades, la funcionalización juega un papel fundamental. De allí el gran interés que se ha despertado en el estudio de estrategias y métodos para conseguir la modificación por vía exohedral o endohedral de estas estructuras.

La radiación por microondas, además de ser una herramienta “limpia”, no presenta un comportamiento invasivo sobre la muestra bajo tratamiento. Esto motiva su uso para activar y acelerar reacciones químicas y procesos físicos. Las microondas reducen las barreras cinéticas al modificar las energías de configuración permitiendo reducir los tiempos de reacción e incrementar el rango reactivo para más bajas temperaturas (Majetich *et al.*, 1995). La funcionalización de nanotubos de carbono con terminales carboxil, carbonil e hidroxil sin la utilización de ultrasonicación y oxidantes agresivos tales como el HNO_3 puede ser obtenida a partir del uso de microondas. Esta técnica permite además, en un solo paso, obtener nanotubos de carbono con nanopartículas sintetizadas *in situ* por reducción metal-i3n durante la funcionalizaci3n.

Obtener dispersiones de nanotubos de carbono de pared simple NTCPS estables en agua y en solventes orgánicos ha sido un problema de gran dificultad, aspecto que se refleja en los bajos valores de solubilidad registrados: 0.08 mg de NTCPS por mL de solvente y la considerable cantidad de tiempo requerido para completar los procesos (Wang *et al.*, 2006). Con el uso de radiaci3n con microondas se

hace posible reducir considerablemente los tiempos de funcionalizaci3n y el uso de solventes para obtener dispersiones estables de NTCPS en el agua. Y. Wang, S. Mitra y Z. Iqbal del Instituto de Tecnología de Nueva Jersey han logrado con radiaci3n por microondas solubilizar en agua NTCPS con concentraciones dispersas de 10 mg/mL en tiempos r3cords de 3 min (Wang *et al.*, 2005). En agua acidificada se obtuvieron concentraciones de 20 mg/mL. Análisis espectrosc3picos indicaron la presencia de grupos carboxílicos $-\text{COOH}$ y sulfónicos $-\text{SO}_2^*\text{OH}$ sobre los nanotubos de carbono, donde uno de tres átomos de carbono fue carboxilado mientras que uno de cada 10 átomos de carbono fue sulfonado.

Estos tipos de funcionalizaci3n resultan de gran importancia para estudios de citotoxicidad en tareas de tratamiento del c3ncer con asistencia de nanotubos de carbono, línea en la que nuestro grupo se encuentra investigando.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la síntesis se utiliz3n como material precursor grafito puro, el cual al ser volatilizado por calentamiento por microondas, produjo el crecimiento de los nanotubos, los cuales son generalmente de pared múltiple. Los nanotubos se pueden obtener con o sin presencia de catalizador, aunque el catalizador facilita el proceso de sublimaci3n del grafito. El catalizador utilizado es nitrato de plata depositado en forma de película delgada sobre el sustrato.

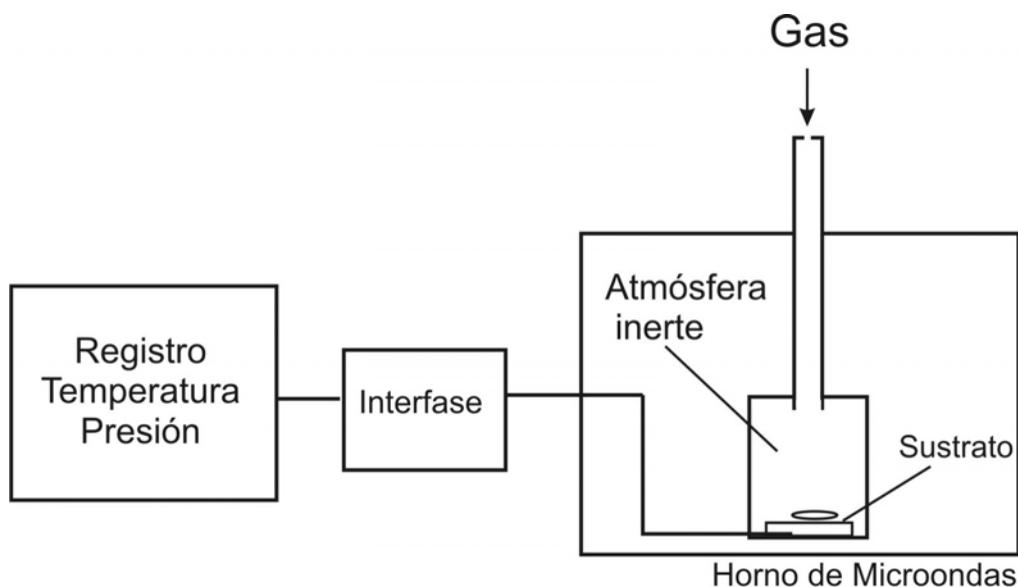


Figura 1. Montaje simplificado para síntesis de nanotubos con microondas.

Como fuente de energía se hace uso de un horno industrial de microondas de 1500 W de potencia y frecuencia de operación de 2.4 MHz. El horno ha sido modificado para permitir que el sustrato y la muestra puedan operar al vacío o con atmósfera inerte y presión controlada. Con sensores de presión y temperatura se registran los valores correspondientes de presión y temperatura y se procesan en un ordenador a través de una interfase electrónica (**Figura 1**).

Para la síntesis de los nanotubos de carbono, se hace uso de grafito en polvo de alta pureza como precursor sobre un sustrato de porcelana. La síntesis se realiza con y sin la presencia de catalizador, el cual se deposita como película delgada sobre el sustrato.

Los tiempos escogidos para el proceso de síntesis corresponden a: 30, 45, 60 y 120 min. La caracterización de los nanotubos de carbono se realiza con un Microscopio Electrónico de Transmisión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La síntesis reportada en este trabajo se realiza a presión atmosférica. El grafito alcanza temperaturas cercanas a los 1700°C después de 20 s lo que permite la evaporación del carbono para la posterior condensación en estructuras de interés: nanotubos, nanofibras, nano y micropartículas.

Con el uso de catalizador, para tiempos menores a 30 min no se observa formación de nanotubos de carbono. A partir de registros fotográficos de microscopía electrónica (**Figura 2**) se observan nanotubos de carbono de pared múltiple. No se encontraron en las muestras nanotubos de pared simple. El intervalo del diámetro externo de los nanotubos de carbono observados con TEM es de 50-100 nm.

En concordancia con lo reportado en (Kharissova et al., 2004) se produce crecimiento de nanotubos de punta cerrada cuando no se hace uso de nanopartículas catalíticas y crecimiento de nanotubos con puntas abiertas y con mayor longitud cuando se realiza el proceso en presencia de nanopartículas de plata como catalizador, presentándose ocasionalmente alojamiento de las partículas dentro del nanotubo. De otra parte, con calentamiento con microondas de ferroceno $Fe(C_5H_5)_2$, conocido ampliamente por su importancia en la síntesis de compuestos organometálicos y sus aplicaciones en la síntesis de polímeros, electroquímica y catálisis asimétrica, se hace posible realizar crecimiento de nanotubos de carbono de pared múltiple alineados verticalmente con partículas metálicas en sus extremos libres. Un aspecto de gran importancia es la posibilidad que se presenta de controlar la longitud de los nanotubos, la cual

como se deriva de las observaciones hechas por microscopía depende drásticamente de los tiempos de calentamiento.

Los nanotubos producto del presente trabajo se han funcionalizado con ADN para su uso en investigación de citotoxicidad en líneas celulares tumorales.

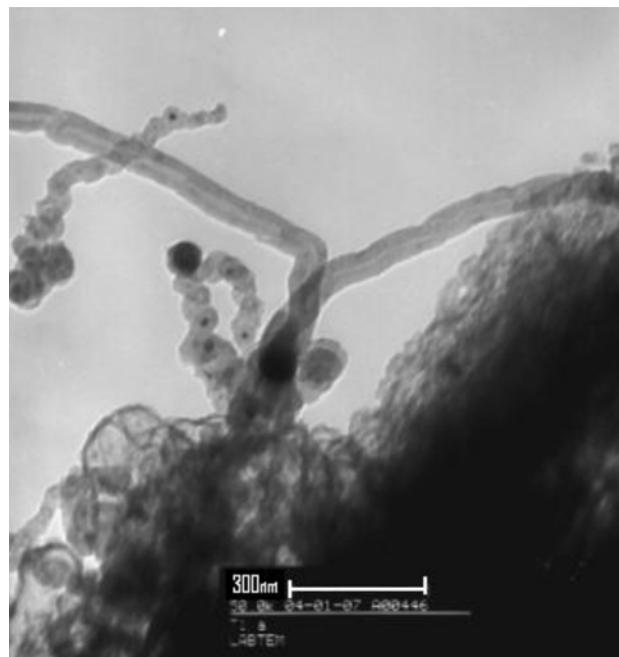


Figura 2. Fotografía tomada con microscopio electrónico de transmisión a 50.000 aumentos de nanotubos de carbono producidos por microondas con nitrato de plata como catalizador.

Un aspecto de gran importancia en el uso de nanotubos de carbono para investigación en nanosensores, nanovectores, nanoelectrónica, etc., es contar con nanotubos de carbono modificados con nanoestructuras capaces de mejorar sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, y térmicas entre otras. Una forma para obtener este tipo de programación físico-química consiste en “llenar” con materiales dotados con la propiedad requerida los nanotubos de carbono durante su proceso de síntesis. Haciendo uso de radiación con microondas para asistir la síntesis de nanotubos de carbono y nitrato de plata como catalizador, se han obtenido nanotubos de carbono con nanopartículas de plata alojadas en su interior identificada su naturaleza con análisis EDX (**Figura 3**). Se está implementando el uso de catalizadores tales como el ferroceno para obtener nanotubos de carbono con una respuesta térmica mucho más sensible a la que se obtiene para nanotubos prístinos o funcionalizados.



Figura 3. Fotografía con microscopio electrónico de transmisión de nanotubo de carbono (100000 aumentos) sintetizado con microondas. Se observa la presencia de nanopartícula de plata de 21 nm de diámetro en su interior identificada con EDX, lo que posibilita una vez funcionalizado el nanotubo para su solubilidad en agua y reconocimiento molecular contar con un *nanovector* para diagnóstico y tratamiento.

Resulta usual en los procesos de síntesis obtener nanotubos de carbono que por su morfología y geometría pueden ser objeto de un especial interés. Se suele obtener para partículas catalíticas de geometrías esféricas nanotubos con superposiciones coaxiales cilíndricas de laminas grafitales, mientras que si las partículas catalíticas son de topología cónica se forman nanotubos de carbono tipo bambú tal como se ilustra en la figura 4. Resulta preferente la formación de nanotubos de carbono tipo bambú con partículas catalíticas de *Co*, *Ni* y *Fe*.

CONCLUSIONES

El uso de las microondas como fuente térmica para procesos de síntesis y funcionalización de nanoestructuras, se



Figura 4. Fotografía con microscopio electrónico de transmisión de nanotubo de carbono tipo bambú obtenido por síntesis con microondas.

potencia como una importante herramienta para asistir algunas de las áreas de la naciente era de la nanotecnología. El calentamiento selectivo, uniforme y volumétrico así como la reducción de los tiempos requeridos para completar los diferentes procesos químicos, son algunas de las ventajas que califican la pertinencia y calidad de la radiación con microondas.

Ante las ventajas que ofrece el método de producción de nanotubos de carbono por radiación en el espectro de las microondas, se requiere intensificar la investigación exploratoria de producción de estas entidades, con parámetros, condiciones y materiales catalíticos que aún no se han reportado, y los cuales puedan contribuir con el desarrollo de nuevas estrategias de funcionalización y programación de propiedades físico-químicas de estos materiales nanoestructurados.

En este trabajo se reporta la síntesis de nanotubos de carbono asistida con microondas, en donde la formación de estas entidades, así como algunas de sus propiedades morfológicas se encuentran estrechamente afectadas por los tiempos de calentamiento y la presencia o no de partículas catalíticas. Se logra sintetizar nanotubos con partículas metálicas en su interior que permiten modificar las propiedades térmicas y hacer posible, después de realizar la tarea de funcionalización (el grupo de nanociencia ya ha funcionalizado los nanotubos con ADN), contar con una plataforma nanoescalar —definida como *nanovector*—, de gran proyección para tareas de recono-

cimiento, tratamiento, diagnóstico y transporte en el área de la salud.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Ciencia y Tecnología Nanoescalar por el suministro de los materiales, así como a la ing. Dery Corredor del Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia.

LITERATURA CITADA

- ANDO, Y.; ZHAO, X.; KATAURA, H.; ACHIBA, Y.; KANETO, K.; TSURUTA, M.; UEMURA, S.; IJIMA, S. Multiwalled carbon nanotubes prepared by hydrogen arc. *Diamond and Related Materials*, 2000, 9: 847-851.
- BELAY, K.; JACKSON, J.; XIN, J. Carbon Nanotubes and Nanofibers Grown by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition on a Nickel Substrate. *MRS Proceedings*, 2003, 788: L12.12.
- BOWER, W. y SHOU, O. Plasma induced alignment of carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 2000, 77: 830-832.
- BUSNAINA, A. 2007. *Nanomanufacturing Handbook*. First edition. CRC Press. Boca Ratón, U.S. 408 págs.
- CHARLIER, J-CH y IJIMA, S. Growth mechanism of carbon nanotubes. In: Dresselhaus, M.; Dresselhaus G.; Avouris, Ph. (eds.). *Carbon Nanotubes: Synthesis, structure properties and applications*. Springer. Germany. 2001, 55-81.
- CHEUNG, C.; KURTZ, A.; PARK, H.; LIEBER, CH. Diameter-controlled synthesis of carbon nanotubes. *Journal Chemical Physics*, 2002, 106: 2429-2433.
- CHUL, Y.; PARK, G.; CHOI, W.; LEE, N.; KIM, J. Growth of carbon nanotubes by microwave plasma-enhanced chemical vapour deposition at low temperature. *Journal Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 2000, 18: 1864.
- DAI, H. Nanotube Growth and Characterization. In: Dresselhaus, M.; Dresselhaus G.; Avouris, Ph. (eds.). *Carbon Nanotubes: Synthesis, structure properties and applications*. Springer. Germany. 2001, 29-53.
- EBBESEN, T. y AJAYAN, P. Large-scale synthesis of carbon nanotubes. *Nature*, 1992, 358: 220.
- EBBESEN, T.; HIURA, H.; FUJITA, J.; OCHIAI, Y.; MATSUI, S.; TANIGAKI, K. Patterns in the bulk growth of carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*, 1993, 209: 83.
- GEDYE, R. SMITH, F.; WESTAWAY, K.; ALI, H.; BALDISERA, L.; LABERGE, L.; ROUSELL, J. *Tetrahedron Letters*, 1986, 27: 279-282.
- GÓMEZ, I. y AGUILAR, J. Estudio del comportamiento de materiales cerámicos expuestos a un campo de microondas. *Ciencia UANL*, 2005, 2: 230-237.
- GUO, T.; NIKOLAEV, P.; THESS, A.; COLBERT, D.; SMALLEY, R. Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chemical Physics Letters*, 1995, 243: 49.
- HARRIS, P. 1999. *Carbon nanotubes and related structures*. First edition. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- HILL, J. y MARCHANT, R. Modelling microwave heating. *Applied. Mathematical Modern*, 1996, 20: 3-15.
- HONG, E.; LEE, K.; OH, S.; PARK, C. Synthesis of carbon nanotubes on organic polymer substrates. *Advanced Materials*, 2002, 14: 676.
- IKEDA, T.; KAMO, T.; DANNO, M. New synthesis method of fullerenes using microwave-induced naphthalene-nitrogen plasma at atmospheric pressure. *Applied Physics Letters*, 1995, 67: 900-902.
- KAPPE, A. y STADLER, A. *Microwaves in Organic and Medicinal Chemistry*. Wiley-VCH. Weinheim. 2005.
- KHARISSOVA, O. Vertically Aligned Carbon Nanotubes Fabricated by Microwaves. *Review Advances Materials Science*, 2004, 7: 50.
- KHARISSOVA, O. y ROBLEDO C. Síntesis de nanoestructuras de carbono mediante microondas. *et al., Ingeniería*, 2004, 23: 6.
- KROTO, H.; HEAT, J.; O'BRIAN, S.; CURL, R.; SMALLEY, R. C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, 1985, 318: 162-163.
- LIDSTROM, J. (ed.). *Microwave Assisted Organic Synthesis*. Blackwell Scientific. 2004.
- LOUPY, A. *Microwaves in Organic Synthesis*. Wiley-VCH. Weinheim. 2002.
- MAJETICH, G.; ITEKS, R. Microwave Power Electromagnetic Energy. *Radiant Physics Chemical*, 1995, 45: 567.
- MATSUSHITA, A.; NAGAI, M.; YAMAKAWA, K., HIRAMATSU, M.; SAKAI, A.; HORI, M.; GOTO, T.; ZAIMA, S. Growth of Carbon Nanotubes by Microwave-excited Non-Equilibrium Atmospheric-Pressure Plasma. *Journal Applied Physics*, 2004, 43: 424-425.
- MENDEZ O.; KHARISSOVA O.; RODRIGUEZ F. Synthesis and Morphology of Nanostructures via Microwave Heating. *Review Advance Materials Science*, 2003, 5: 398.
- MEYYAPPAN, M. Growth: CDV and PECVD. In: Meyyappan, M. (ed.). *Carbon nanotubes Science and Applications*. CRC Press. Boca Ratón, U.S. 2005, 99-112.

- MIN, Y.; BAE, E.; OH, B.; KANG, D.; PARK, W. Low- Temperature growth of single-walled carbon nanotubes by water plasma chemical vapour deposition. *Journal American Chemical Society*, 2005, 127: 12498-12499.
- MISHRA, P.; SETHI, G.; UPADHYAYA, A. *Methods Materials Transactions*, 2006, 37B: 839.
- MORAVSKY, A.; WEXLER, E.; LOUTFY, R. Growth of carbon nanotubes by arc discharge and laser ablation. In: Meyyappan, M. (ed.). *Carbon nanotubes Science and Applications*. CRC Press. Boca Ratón, U.S. 2005, 65-97.
- SUN, X. HWANG J.; HUANG X.; LI, B; SHI, S. Effects of Microwave on Molten Metals With Low Melting Temperatures. *Journal Minerals & Materials Characterization & Engeering*, 2005, 4: 107-112.
- WANG, Y.; IQBAL, Z.; MITRA, S. Rapidly functionalized Water-Dispersed Carbon Nanotubes at High Concentration. *Journal American Chemical Society*, 2006, 128: 95.
- YOON, B.; HONG, E.; JEE, S.; YOON, D.M.; SHIN, D.; SON, G.; LEE, K.; KIM, H.; PARK, CH. Fabrication of Flexible Carbon Nanotube Field Emitter Arrays by Direct Microwave Irradiation on Organic Polymer Substrate. *American Chemical Society*, 2005, 127: 8235.
- YOSHIMURA, Y.; TANAKA, K.; UEDA, K. Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition of Carbon Nanostructures Using Biological Molecules. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 4A: 1562.