

LA NANOTECNOLOGÍA DEL CARBONO



El carbono, elemento presente en los seres vivos, en el grafito de los lápices o en un diamante, puede revolucionar la ciencia de materiales y la nanotecnología en este nuevo siglo que inicia.

Mauricio Terrones

El carbono es un elemento muy abundante y primordial en la naturaleza. Todos los seres vivos están constituidos de carbono, y basta con quemar algún material orgánico para que éste se carbonice. Asimismo, cuando escribimos con un lápiz o contemplamos la belleza de un diamante no imaginamos que tanto el grafito del lápiz, como la piedra preciosa están hechos por átomos del mismo elemento: carbono.

GRAFITO Y DIAMANTE

La diferencia entre el diamante y el grafito consiste básicamente en que los átomos están arreglados de diferentes formas. En el grafito los átomos de carbono forman capas planas compuestas de hexágonos de carbono, en las que cada átomo está conectado con otros tres,

y los ángulos entre dos carbonos vecinos es de 120 grados. Las capas a su vez están separadas por una distancia de 0.335 nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro).

En el diamante, cada átomo está unido con otros cuatro átomos localizados en los vértices de un tetraedro y separados por una distancia de 0.156 nanómetros, con ángulos de 109 grados.

Las diferencias en el acomodo de los átomos de carbono dentro de estos materiales determinan sus propiedades. Así tenemos que el diamante es el material más duro que existe y no conduce la electricidad, mientras que el grafito es muy blando y sí la conduce.

NUEVAS FORMAS DEL CARBONO: FULLERENOS Y NANOTUBOS

En 1985 el doctor Harold Kroto, de la Universidad de Sussex, y sus colegas Richard Smalley y Robert Curl, de la Universidad de Rice, publicaron el descubrimiento de una nueva molécula de carbono compuesta de 60 átomos (C_{60}).

Esta molécula, que tiene la misma forma de una pelota de fútbol, fue llamada *buckminsterfullereno* (véase figura 1a), en honor al arquitecto norteamericano que diseñó los primeros domos geodésicos: Robert Buckminster Fuller. Los fullerenos consisten de redes cerradas de carbono con enlaces tipo grafito, que contienen al menos 12 pentágonos y cualquier número de hexágonos.

En 1990, Wolfgang Kratschmer, Donald Huffman y sus colegas reportaron la obtención de cristales de C_{60} (véase figura 1b). Cada molécula de C_{60} tiene un diámetro de 0.7 nanómetros. Desde entonces, la nanotecnología del carbono se ha desarrollado rápidamente; a la fecha, han sido reportadas más de 10 mil publicaciones.

Dentro de las principales aplicaciones del C_{60} se encuentran la fabricación de: a) nanocápsulas para almacenar desechos radiactivos, que impiden escapes peligrosos; b) inhibidores de enzimas relacionadas con virus como el sida, y c) nuevos materiales cristalinos.

Otras importantes contribuciones en este campo del conocimiento son la identificación y producción de partículas poliédricas de grafito y los nanotubos de carbono (fullerenos alargados y anidados; véase figura 1c y d).

En 1991, Sumio Iijima encontró que el carbono podía formar fullerenos alargados o tubos muy pequeños, llamados *nanotubos* (véase figura 1d). Los nanotubos pueden tener varias capas o una sola capa. Estos materiales son ahora producidos por diversos métodos (véase figura 2) que incluyen el uso de un arco eléctrico entre electrodos de grafito, la pirólisis de hidrocarburos sobre metales catalizadores, la vaporización de sustratos metal/grafito por rayo láser, y la electrólisis de electrodos inmersos en sales iónicas fundidas, como se describe más adelante.

Los nanotubos han revolucionado la tecnología del carbono, ya que sus propiedades mecánicas son sorprendentes: son cien veces más resistentes que el acero y seis veces más ligeros. Estos tubos también pueden llegar a conducir la electricidad, como el cobre, y se comportan como conductores cuánticos y superconductores a bajas temperaturas. Por estas razones es importante producir nanotubos de carbono con determinadas dimensiones y características con el fin de desarrollar nuevas tecnologías.

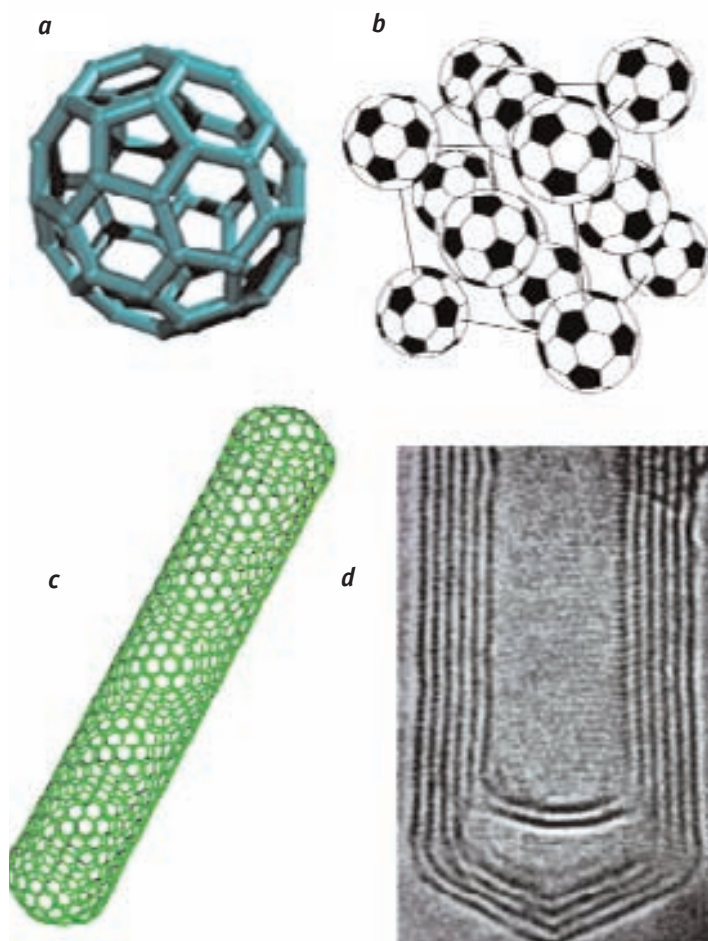


Figura 1. a. Modelo del carbono 60 (C_{60}) o buckminsterfullereno. Esta molécula se compone de 20 hexágonos y 12 pentágonos, y su diámetro es de 0.7 nanómetros. b. Cristal de C_{60} (fase cúbica centrada en las caras); el parámetro de la red cristalina es de 1.4 nanómetros. c. Modelo molecular de un nanotubo de carbono, que puede ser visualizado como un fullereno alargado. Las "tapas" del tubo contienen anillos pentagonales que son necesarios para cerrar la estructura grafitica del carbono. d. Micrografía de transmisión de alta resolución de un nanotubo de carbono de seis capas, en donde se muestra la "tapa" que contiene los anillos pentagonales de carbono. Este nanotubo fue producido por el método de arco eléctrico (el espaciamiento entre las capas es de 0.34 nanómetros).

MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO

a) *Arco eléctrico*: Este método consiste en generar un arco eléctrico entre dos barras de grafito dentro de una atmósfera de helio. Al generar el arco eléctrico (véase figura 3a), el ánodo se consume y a su vez se crea un depósito en el cátodo (véanse figuras 3b y c). Los nanotubos se extraen de la corona interna del depósito en el cátodo. Estos nanotubos están formados por varias capas (véanse figuras 3c-d), y sus diámetros varían desde 2 hasta 30 nanómetros, el espacio entre las capas es de 0.34 nanómetros (valor muy cercano al espaciado en el grafito, que es de 0.335 nanómetros). Este método también se emplea para producir fullerenos como el C₆₀; sin embargo, los fullerenos se extraen del hollín que se deposita en las superficies de la cámara de reacción, y no del depósito formado en el cátodo.

Se sigue investigando el mecanismo por el que crecen los nanotubos formados por este método. Existen dos posibilidades: la primera establece que átomos o cúmulos de carbono (C, C₂, C₃) se adhieren a los bordes de un anillo de carbono, haciendo crecer el tubo, el cual se cierra cuando las condiciones de formación dejan de ser adecuadas. El segundo esquema propone que los nanotubos son fullerenos alargados a cuyas paredes se añaden átomos de carbono.

Hay que enfatizar que los nanotubos producidos por este método se encuentran coexistiendo con otros productos grafiticos, como partículas poliédricas y estructuras amorfas; por ello es necesario purificarlos por oxidación, la cual tiene la desventaja de que destruye 95 por ciento de la muestra. Afortunadamente han sido reportadas formas no destructivas de purificar nanotubos: consisten en formar suspensiones coloidales bien dispersas junto con tensoactivos, las cuales se filtran, resultando en la precipitación única de nanotubos.

b) *Pirólisis de hidrocarburos*: El método de pirólisis consiste en calentar un hidrocarburo como benceno, acetileno, naftaleno, etileno u otro compuesto que contenga carbono, en la presencia de un metal de transición (cobalto, níquel o hierro;

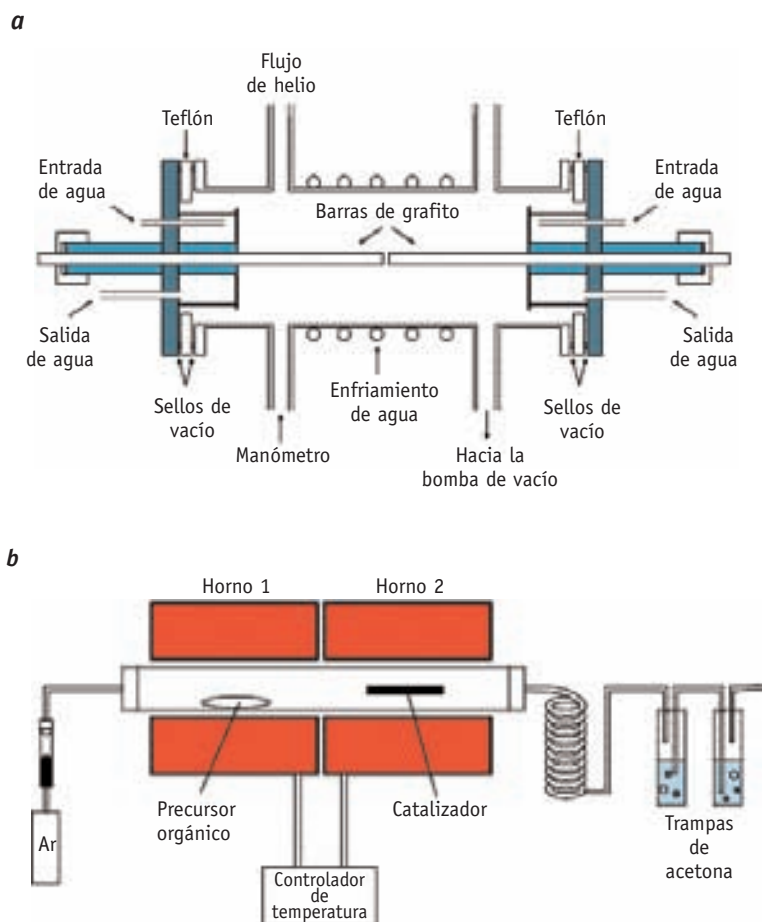


Figura 2. a. Dispositivo experimental del método de arco eléctrico, en donde se produce un plasma al pasar corriente entre dos barras de grafito. **b.** Esquema del método de producción de nanotubos utilizando la pirólisis de hidrocarburos.

véase figura 2b) que actúa como catalizador. Sin embargo, desde las décadas de los sesenta y setenta era bien conocido que podían obtenerse fibras de carbono utilizando el calentamiento de hidrocarburos. Las fibras de carbono no son cilindros anidados, ya que tienen mayores dimensiones y estructuras gráficas con una gran cantidad de defectos e impurezas.

Quizá el primero en producir microfibras de carbono fue Schutzenberger, hace más de cien años, quien hizo experimentos calentando cianógenos en presencia de metales de transición; es claro que él no podía observar estructuras nanométricas, ya que la tecnología se lo impedía.

Sin embargo, es posible que en estos procesos pirolíticos haya generado nanofibras de carbono. Se han propuesto dos mecanismos principales para la formación de nanofibras de carbono, los cuales pueden aplicarse a los nanotubos: el primero, propuesto por Baker y sus colaboradores, consiste en la difusión de carbono a través de una partícula catalizadora, precipitándose al otro extremo de ésta en forma de dominios gráfiticos. El segundo, propuesto por Baird y Freier en 1974, y Oberlin y Endo en 1976, consiste en que los filamentos de carbono se forman por medio de difusión de cúmulos de carbono sobre la superficie de la partícula catalizadora. En ambos mecanismos es muy importante el tamaño de la partícula, el tipo de hidrocarburo y la temperatura, ya que estos parámetros controlan las dimensiones, morfología y propiedades de los nanotubos (véase figura 4).

Los métodos pirolíticos son utilizados por varios grupos en el mundo, ya que pueden formar arreglos ordenados de nanotubos alineados. Uno de los trabajos pioneros en el área fue desarrollado por M. Terrones y sus colaboradores, quienes utilizaron la ablación por láser sobre películas delgadas de cobalto depositadas en sustratos de óxido de silicio; posteriormente se imprimieron patrones periódicos en estas películas utilizando un láser y lentes ópticos cilíndricos. Después de llevar a cabo la pirólisis de algún precursor orgánico (melamina) sobre estos sustratos,

Quizá el primero en producir microfibras de carbono fue Schutzenberger

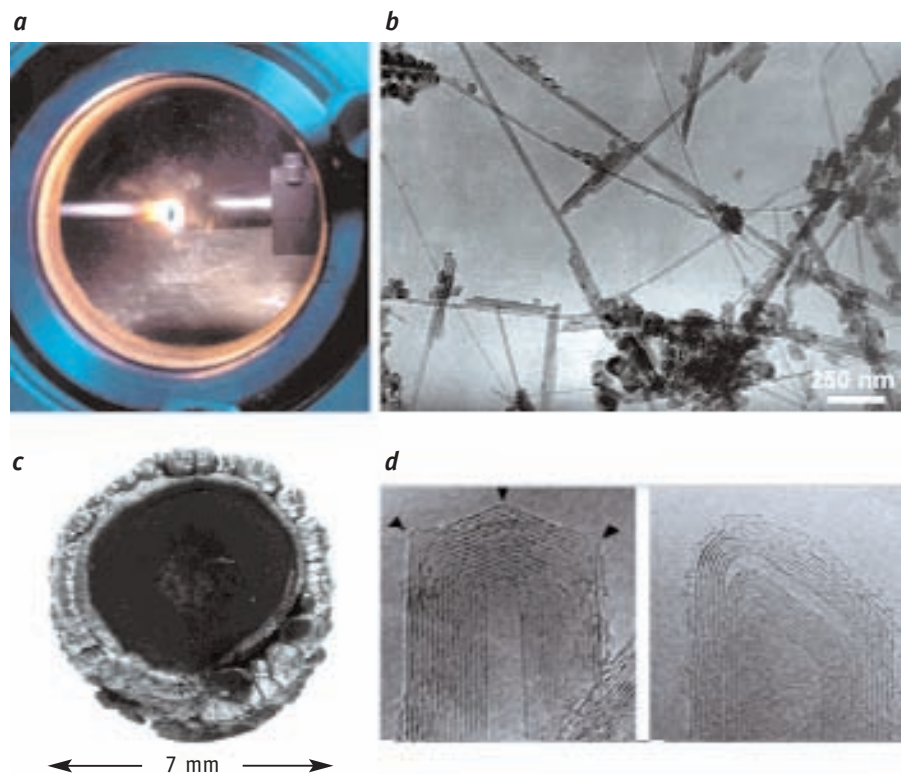


Figura 3. *a.* Plasma generado durante el arco eléctrico entre dos barras de grafito en una atmósfera de helio (cortesía de Philipp Redlich y de la Sociedad Max-Planck en Alemania). *b.* Nanotubos de varias capas obtenidos por el método de arco eléctrico; también se observa la presencia de partículas poliédricas de grafito. *c.* Depósito generado en el cátodo después de realizar los experimentos de arco eléctrico; los nanotubos de carbono observados en *b* provienen de la corona interior (centro oscuro) de dicho depósito. *d.* Micrografías de transmisión de alta resolución que muestra la estructura de dos tubos producidos por el arco eléctrico (las flechas indican las posiciones de los pentágonos dentro de la red hexagonal del carbono; el espaciamiento interplanar de las capas es de 0.34 nanómetros).

se obtuvieron nanotubos alineados de prácticamente las mismas dimensiones (menos de 60 micrómetros de largo, con diámetros que oscilan entre los 30 y los 50 nanómetros) (véase figura 4).

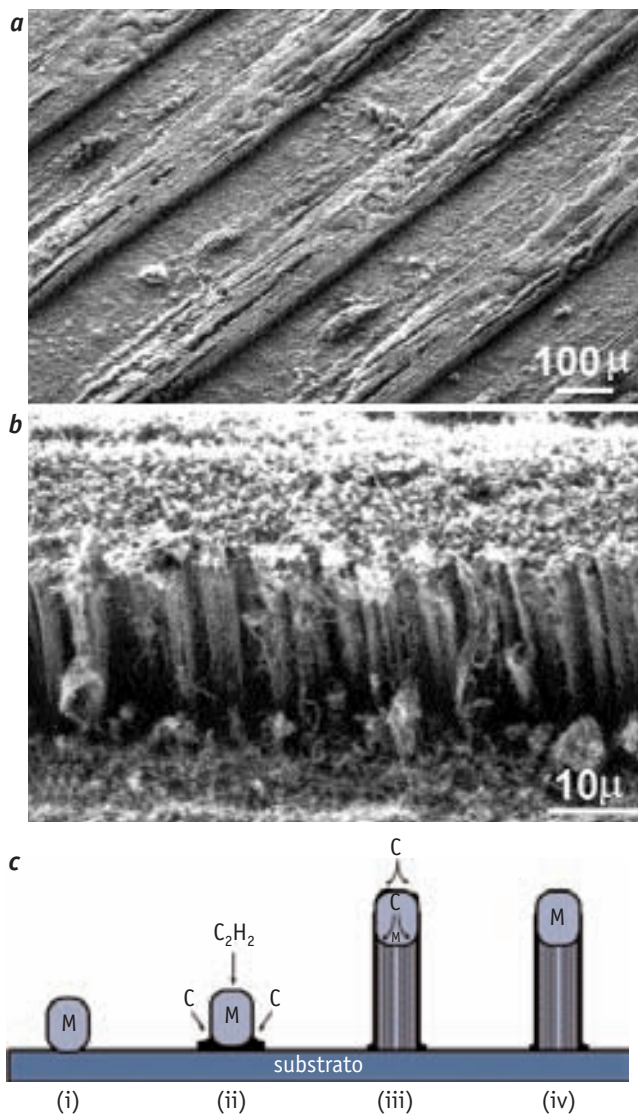


Figura 4. *a.* y *b.* Micrografías de microscopía de barrido de nanotubos alineados de carbono producidos por pirólisis de melamina sobre sustratos tratados con técnicas de rayo láser. Los nanotubos únicamente crecen en los canales donde se encuentran las partículas metálicas catalizadoras. *c.* Mecanismo de crecimiento de los nanotubos propuesto por Baker y colaboradores. En éste las partículas de metal son responsables de la aglomeración del carbono y su precipitación a través de la partícula (véase esquema).

c) Vaporización de láser: Este método consiste en hacer incidir un láser de alta potencia en un blanco de grafito que se encuentra dentro de un horno a 1200 grados centígrados. La condensación del material generado por el láser es la responsable de la formación de los nanotubos. Cuando al blanco de grafito se le añade un metal como el níquel o cobalto, se producen nanotubos de una sola capa. Estos tubos crecen en “manojos” o “cuerdas”, compuestas por 100 a 500 tubos (véase figura 5). La distribución de diámetros de estos nanotubos es muy pequeña, y se ha reportado que se trata de un sólo tipo de nanotubo de una sola capa y con diámetro de 0.14 nanómetros. Este tipo de nanotubos de una sola capa también puede ser obtenido por medio del arco eléctrico en presencia de cobalto o níquel y mezclas de níquel e itrio.

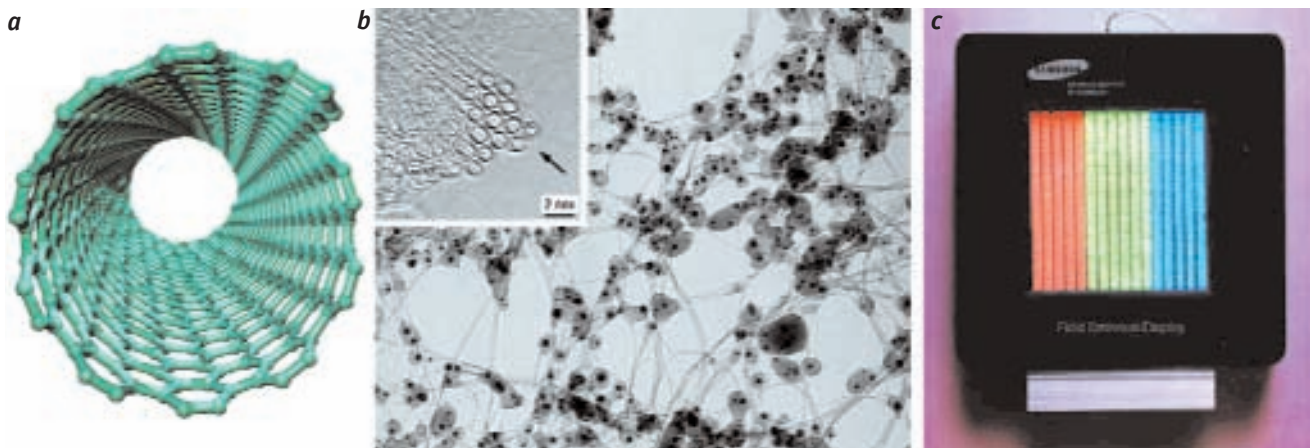
d) Electrólisis: La técnica de electrólisis involucra el paso de corriente directa entre dos electrodos de grafito sumergidos en una sal fundida de cloruro de litio a 600 grados centígrados, en una atmósfera de argón. Dependiendo de las condiciones experimentales, entre 20 y 30 por ciento del material de carbono consiste en nanotubos de varias capas. Tanto la profundidad del cátodo en la sal derretida como la corriente juegan un papel importante en la formación de los tubos.

Los métodos descritos anteriormente presentan ventajas y desventajas. Por ejemplo, en los métodos que involucran temperaturas bajas (alrededor de 800 grados centígrados), como la pirólisis y electrólisis, los nanotubos no son tan perfectos como los producidos por medio del arco eléctrico, pues presentan defectos y vacancias (espacios libres que no están ocupados por los átomos de carbono dentro de la red hexagonal del grafito). El arco eléctrico involucra temperaturas que pueden alcanzar hasta 4 mil grados centígrados. Sin embargo, con los métodos que utilizan bajas temperaturas es posible tener más control en las dimensiones de los tubos. Por otro lado, en los métodos de pirólisis de hidrocarburos siempre queda una partícula del catalizador en la punta de los tubos. Tanto los defectos producidos por las bajas temperaturas como la presencia de los catalizadores pueden ser eliminados por medio de técnicas químicas de purificación y tratamientos térmicos.

**PROPIEDADES ELECTRÓNICAS
Y MECÁNICAS DE LOS NANOTUBOS**

Las primeras mediciones de conductividad eléctrica de nanotubos de carbono con varias capas fueron hechas utilizando microcontactos de oro conectados con técnicas litográficas. Estos estudios demostraron que la resistencia eléctrica dependía de la temperatura, en un intervalo de 2 a 300 kelvin, y que los nanotubos eran semimetálicos. Posteriormente, la conductividad de nanotubos alineados de varias capas mostró que los tubos se comportaban como nanoconductores. Más recientemente, se demostró que la conductividad de nanotubos de una sola capa depende de la helicidad (el arreglo en que la red hexagonal del grafito se encuentra orientada con respecto al eje del tubo) y el diámetro;

Los nanotubos pueden ser conductores o semiconductores



es decir, los nanotubos pueden ser conductores o semiconductores. Estos estudios también revelaron que los nanotubos individuales de una sola capa con diámetro de 0.14 nanómetros conducen la electricidad en forma discreta (la gráfica de voltaje contra corriente es escalonada, en vez de ser lineal), y por lo tanto son conductores cuánticos. Posteriormente se encontró que los nanotubos de una sola capa de 0.4 nanómetros de diámetro son superconductores eléctricos (no ofrecen resistencia al paso de electrones) a temperaturas del orden de 15 kelvin. Por último, se han producido nanocircuitos utilizando nanotubos. Por ejemplo, se generaron transistores que operan a temperatura ambiente utilizando un nanotubo de una sola capa. Es muy importante recalcar que la geometría (el acomodo de los átomos en el material) determina las propiedades tanto mecánicas como electrónicas de los nanotubos de carbono.

Observaciones utilizando microscopios electrónicos de alta resolución muestran que los nanotubos de carbono son excep-

Figura 5. *a.* Modelo de un nanotubo de carbono mostrando la sección transversal. *b.* “Manojos” o “cuerdas” de nanotubos de una sola capa producidos por el método de arco eléctrico, junto con partículas catalizadoras de níquel e itrio (regiones oscuras); en la ampliación del lado izquierdo de la figura *b* se muestran las secciones transversales de los nanotubos (cada tubo tiene aproximadamente 1.4 nanómetros de diámetro). *c.* Prototipo de una pantalla de televisión fabricado por la compañía Samsung, utilizando nanotubos de una sola capa (cortesía Samsung Electronics, Corea).

cionalmente flexibles y no experimentan fracturas. Es decir, pueden ser doblados mecánicamente por medio de un baño ultrasónico, pulverizándolos con trituradores o usando una resina polimérica. Los cálculos teóricos predicen estas propiedades. La extraordinaria flexibilidad de los nanotubos los hace excelentes candidatos para la fabricación de polímeros de alta resistencia.

COALESCENCIA DE NANOTUBOS Y SUS IMPLICACIONES

La coalescencia (agrupamiento) de cúmulos de átomos es un fenómeno muy común, observado experimentalmente. Este efecto se produce debido a que minimiza la energía de la superficie, ya que los cúmulos más grandes son más estables. Sin embargo, la coalescencia de moléculas de dimensiones mayores, como los nanotubos de carbono de una sola capa, parece ser casi imposible.

Muy recientemente se ha observado la coalescencia *in-situ* de nanotubos de carbono de una sola capa, y la creación de conexiones del tipo “Y” y “T” utilizando altas irradiaciones electrónicas a temperaturas elevadas (700-800 °C). En el mismo estudio, cálculos

Es posible almacenar otros gases como nitrógeno, argón y helio en el conducto interno de los tubos multicapa

de dinámica molecular por medio de métodos del tipo *tight binding* demuestran que la coalescencia de los tubos ocurre en forma de “zipper” o “cremallera”, y se debe primordialmente a la generación de vacancias (espacios vacíos dentro de la red hexagonal del grafito) y defectos en los nanotubos de carbono. Estos resultados demuestran que es posible fabricar nanotransistores y nanocircuitos utilizando estas técnicas, y que una nueva era en la química de nanotubos de carbono está comenzando.

APLICACIONES DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO

Algunas aplicaciones recientes de los nanotubos de carbono comprenden su uso como: *a)* materiales con capacidad de almacenamiento de gases como hidrógeno, argón o nitrógeno; *b)* sensores de gases tóxicos; *c)* fuentes de emisión de campo para el desarrollo de pantallas ultradelgadas de televisión y puntas para microscopios de efecto túnel; y *d)* contenedores de nanopartículas metálicas ferromagnéticas en procesos de almacenamiento de datos o tintas magnéticas en xerografía.

a) Almacenamiento de gases: La fabricación de celdas de energía que utilizan hidrógeno podría revolucionar la industria de la transportación, ya que la combustión de hidrógeno únicamente libera agua como residuo. Sin embargo, el principal problema para la creación de automóviles “ecológicos”, utilizando hidrógeno como combustible, es el almacenamiento de este gas en celdas de pesos livianos que sean capaces de absorber grandes cantidades de gas. Debido a que los manojos de nanotubos de una sola capa cuentan con cavidades internas e intertubulares, es posible el almacenamiento de hidrógeno. Asimismo, también es factible el almacenamiento de hidrógeno en nanotubos producidos por pirólisis, los cuales presentan defectos. Varios grupos han demostrado que es posible almacenar hidrógeno en nanotubos de una sola capa.

Afortunadamente se ha demostrado muy recientemente que es posible almacenar otros gases como nitrógeno, argón y helio en el conducto interno de los tubos multicapa. Estos resultados proporcionan esperanzas para el almacenamiento de gases e hidrocarburos como el metano. Los nanotubos se visualizan como los cilindros más pequeños que puedan construirse.

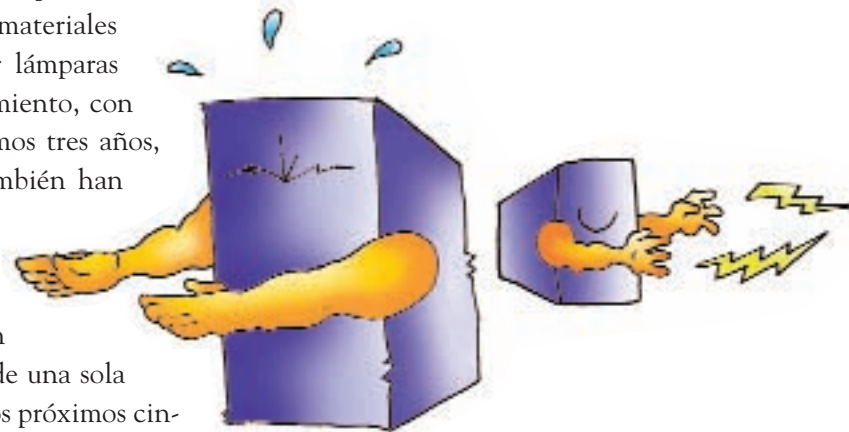
SENSORES

En el año 2000, Dai y sus colaboradores demostraron que la conductividad de pastillas fabricadas con nanotubos de una so-

la capa varía dependiendo de la atmósfera gaseosa en la que se encuentren los tubos. Por ejemplo, si los tubos son expuestos repentinamente a una atmósfera que contiene únicamente uno por ciento de amoníaco, la conductividad de los tubos disminuye casi instantáneamente. Asimismo si los nanotubos son expuestos a 200 partes por millón de óxido nítrico, la conductividad de las muestras aumenta rápidamente. Estos resultados demuestran el gran potencial que tienen los nanotubos en el área de sensores de gases peligrosos. Se están llevando a cabo nuevas investigaciones en este rubro.

FUENTES DE EMISIÓN DE CAMPO

En 1995, Walter de Heer y colaboradores demostraron que los nanotubos de varias capas de carbono se comportan como emisores de campo que operan con altas intensidades de corriente y a bajos voltajes. Estos resultados implican que es posible generar pantallas de televisión de ultra alta definición, ya que cada pixel estaría formado por uno o varios nanotubos. Otra ventaja de estos materiales es que también es posible producir lámparas de alta luminosidad y poco calentamiento, con voltajes muy reducidos. En los últimos tres años, los nanotubos de una sola capa también han mostrado propiedades extraordinarias de emisión de electrones, y la compañía Samsung en Corea ha fabricado pantallas de televisión con emisores que contienen nanotubos de una sola capa. Esta compañía espera que en los próximos cinco años estén en el mercado pantallas de televisión o monitores de alta definición que contengan nanotubos. (véase figura 5c).



En los próximos cinco años
estarán en el mercado
pantallas de televisión
o monitores de alta definición
que contengan nanotubos

ALMACENAMIENTO DE DATOS

También es posible llenar los nanotubos con metales y otros materiales. Durante las pasadas décadas, la generación de nanoalambres de hierro ha sido imposible debido a que este metal se oxida muy fácilmente, generando una capa de óxidos de hierro. Por esta razón, la idea de encapsular nanoalambres sensibles al aire dentro de nanotubos de carbono es altamente viable y potencialmente eficaz. De esta manera, es posible evitar que se formen capas de óxidos que provoquen anomalías en el campo magnético sobre la superficie de los nanoalambres.

Recientemente se han producido satisfactoriamente películas de menos de 2 milímetros cuadrados y menos de 40 milímetros de espesor de nanotubos alineados llenos de hierro (véanse figuras 6 *a* y *b*). Los tubos de hierro están constituidos por monocristales y tienen dimensiones que varían desde 5 a 40 nanómetros de diámetro externo y menos de 10 micrómetros de longitud, mientras que los tubos de carbono que los envuelven muestran diámetros externos de aproximadamente 20 a 70 nanómetros y menos de 40 milímetros de largo (véanse figuras 6 *c* y *d*).

Este tipo de materiales tienen aplicaciones en el área de almacenamiento magnético de información, en el que cada na-

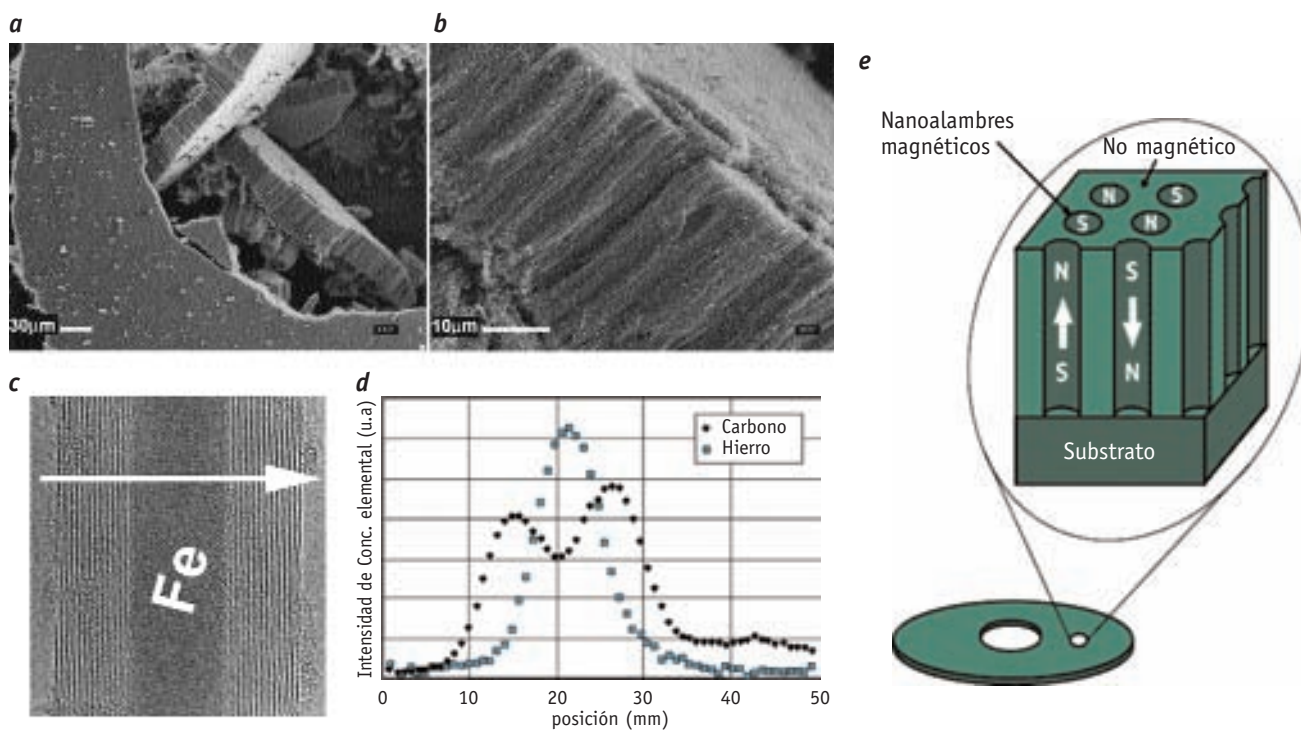


Figura 6. Micrografías electrónicas de barrido de baja *a.* y alta *b.* resolución de nanotubos alineados de carbono llenos de hierro. *c.* Micrografía de transmisión de alta resolución de un nanotubo de carbono lleno de hierro, producido por el método de pirólisis de ferroceno y C_{60} en la presencia de argón a 900 grados centígrados. *d.* Línea de barrido elemental (flecha blanca en *c*), que demuestra que el nanotubo está lleno de hierro. *e.* Esquema que demuestra el gran potencial que los nanoalambres ferromagnéticos tienen en la fabricación de sistemas de almacenamiento de datos, en los que un nanoalambre se comportaría como un *bit* de información.

noalambre podría ser magnetizado en dos posibles direcciones (asociando así un “cero” o un “uno” en el código binario de memoria), y constituiría un *bit* de información por cada nanoestructura (véase figura 6*e*). Esto incrementaría la densidad de almacenamiento de información. Asimismo, estos materiales también son útiles en el desarrollo de nuevos productos en las industrias de la xerografía y pigmentos (*toners*) magnéticos.

Muy recientemente también se han producido nanoalambres de aleaciones metálicas. Como ejemplo tenemos el INVAR, una aleación de hierro y níquel que tiene un coeficiente de expansión térmico casi nulo. Estos resultados muestran que en principio es posible generar cualquier tipo de aleación a escalas nanométricas; sin embargo, sus propiedades serán diferentes a las fases en bulto (macrométricas).

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el carbono, elemento abundante en la naturaleza, puede revolucionar la ciencia de materiales y la nanotecnología en este nuevo siglo que comienza. Sin embargo, falta mucho por hacer para que en un futuro muy próximo veamos dispositivos electrónicos fabricados con estructuras de carbono en lugar del silicio. De esta manera los *chips* fabricados en la actualidad con silicio podrían ser reemplazados por otros hechos de carbono. En un futuro muy cercano, palabras como autoensamblaje, nanotecnología, tectónica molecular, fullerenos y nanotubos serán muy comunes, tanto como el grafito de la punta de un lápiz y el diamante de un anillo.

Bibliografía

- De Heer, W. A., A. Chatelain y D. Ugarte (1995), "A carbon nanotube field-emission electron source", *Science*, 270, 1179-1180.
- Dresselhaus, M. S., G. Dresselhaus y P. C. Eklund (1996), *Science of fullerenes and carbon nanotubes*, San Diego, Academic Press.
- Grobert, N., M. Mayne, M. Terrones, J. Sloan, R. E. Dunin-Borkowski, R. Kamalakaran, T. Seeger, H. Terrones, M. Rühle, D. R. M. Walton, H. W. Kroto y J. L. Hutchison (2001), "Alloy nanowires: invar inside carbon nanotubes", *Chemical Communications*, 5, 471-472.
- Grobert N., M. Terrones, Ph. Redlich, H. Terrones, R. Escudero, F. Morales, W. K. Hsu, Y. Q. Zhu, J. P. Hare, M. Rühle, H. W. Kroto y D. R. M. Walton (1999), "Enhanced magnetic coercivities in Fe nanowires", *Applied Physics Letters*, 75, 3366-3368.
- Hsu, W. K., J. P. Hare, M. Terrones, H. W. Kroto, D. R. M. Walton y P. J. F. Harris (1995), "Condensed-phase nanotubes", *Nature*, 377, 687.
- Kong, J., N. R. Franklin, C. W. Zhou, M. G. Chapline, S. Peng, K. J. Cho y H. J. Dai (2000), "Nanotube molecular wires as chemical sensors", *Science*, 287, 622-625.
- Kroto, H. W., J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl y R. E. Smalley (1985), " C_{60} : buckminsterfullerene", *Nature*, 318, 162-163.
- Liu, C., Y. Y. Fan, M. Liu, H. T. Cong, H. M. Cheng y M. S. Dresselhaus (1999), "Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature", *Science*, 286, 1127-1129.
- Terrones, M., H. Terrones, J. C. Charlier, F. Banhart y P. M. Ajayan (2000), "Coalescence of single walled carbon nanotubes", *Science*, 288, 1226-1229.
- Terrones, M., N. Grobert, J. Olivares, J. P. Zhang, H. Terrones, K. Kor-datos, W. K. Hsu, J. P. Hare, H. W. Kroto, K. Prassides, A. K. Cheetham, P. D. Townsend y D. R. M. Walton (1997), "Controlled production of aligned-nanotube bundles", *Nature*, 388, 52-55.
- Terrones, M., N. Grobert, W. K. Hsu, Y. Q. Zhu, W. B. Hu, H. Terrones, J. P. Hare, H. W. Kroto y D. R. M. Walton (1999), "Advances in the creation of filled nanotubes and novel nanowires", *Materials Research Society Bulletin*, 24, 43-49.

Terrones, M., R. Kamalakaran, T. Seeger y M. Rühle (2000), "Novel nanoscale gas containers: encapsulation of N_2 in CN_x nanotubes", *Chemical Communications*, 23, 2335-2336.

Terrones, M., W. K. Hsu, H. W. Kroto y D. R. M. Walton (1998), "Nanotubes: a revolution in material science and electronics", en A. Hirsch (editor), *Fullerenes and related structures*, Springer-Verlag, Topics in Chemistry Series, vol. 199, cap. 6, pp.189-234.

Mauricio Terrones es licenciado en ingeniería física por la Universidad Iberoamericana. En 1997 finalizó sus estudios doctorales en química-física en la Universidad de Sussex, Inglaterra, bajo la supervisión de sir Harold W. Kroto. Posteriormente realizó estudios posdoctorales en la Universidad de Sussex y en la de California en Santa Bárbara, EUA. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. En 1999 le fue otorgada una membresía por la Fundación Alexander von Humboldt para realizar estudios sobre nanoestructuras de carbono en el Max-Planck-Institut für Metallforschung en la ciudad de Stuttgart, Alemania. Actualmente es investigador titular en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. En el año 2001 recibió el Premio Nacional de Química "Andrés Manuel del Río" en el área de investigación. En ese mismo año también recibió el premio Javed Husain y la medalla Albert Einstein, que otorga la UNESCO a jóvenes investigadores menores de 35 años, por sus contribuciones a la nanotecnología del carbono. Cuenta con más de 100 publicaciones con arbitraje en las mejores revistas internacionales del campo. Ha sido pionero en: 1) la creación de fullerenos esféricos utilizando defectos (junto con su hermano Humberto); este modelo ahora se conoce mundialmente como el "modelo Terrones"; 2) la predicción de nuevos alótropos metálicos de carbono; 3) la determinación de las propiedades electrónicas de nanotubos; 4) la introducción de defectos en sistemas grafiticos; y 5) el mecanismo de coalescencia de nanotubos de carbono.