

Grafeno: un material con potencial para la tecnología electrónica del futuro

Procesamiento de aleaciones semiconductoras Ga(In)N

Hidróxidos dobles laminares:
liberadores de moléculas
biológicas activas

Hacia la nanociencia verde:
nanomateriales, nanoproductos
y nanorresiduos

Depósito de nanomateriales
sobre fibras ópticas



PRESENTACIÓN

Continuando con el propósito de nuestra revista, que es el de dar a conocer algunas de las investigaciones que se realizan en el marco de la ciencia e ingeniería de materiales, les presentamos nuestro número 19, que incluye artículos que, como ya es habitual, resumen trabajos relacionados con los materiales que interesan en áreas muy diferentes de la ciencia.

En este número de **Materiales Avanzados**, se presentan cinco artículos. Uno de ellos está dedicado a mencionar las propiedades básicas y, sobre todo, las aplicaciones más recientes y las previstas para el futuro de un material muy interesante, el grafeno. En otro ensayo nuestros colegas hablan de un tema muy actual, las celdas solares; por supuesto que, tratándose de nuestra revista, el artículo está enfocado a los materiales más novedosos involucrados en este tema. Un texto más presenta las alianzas posibles entre materiales hospedadores y materiales huéspedes para formar los nuevos materiales híbridos que la industria médica reclama actualmente. Para nuestros lectores interesados en las nanoestructuras, incluimos un artículo que describe un método novedoso para hacer crecer nanoestructuras sobre fibras ópticas mediante la presión de radiación. Y ya que estamos en el tema de las nanoestructuras, les presentamos un artículo que se puede tomar como una reflexión sobre el uso de los nanomateriales y sus consecuencias.

Materiales Avanzados se elabora gracias a la participación de todos los autores que escriben sobre sus investigaciones y a los miembros del Comité Editorial, pero también es invaluable el trabajo de nuestros revisores y amigos que nos apoyan incondicionalmente. Gracias a todos por su participación.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Materiales Avanzados es una revista de divulgación científica, cuyo propósito es mostrar y discutir los descubrimientos en el área de la investigación en materiales. Los artículos y las secciones recurrirán al lenguaje científico especializado, necesario para mantener el rigor del tema. El principal objetivo de la revista es el de difundir información sobre materiales entre lectores habituados a los temas de investigación.

La revista se publica en español, cada seis meses.

Elaboración de los textos

Se consideran dos tipos de secciones:

- Artículos cortos, de un máximo de 11,000 caracteres (contando espacios), que ocuparán cuatro páginas de la revista.
- Artículos largos, con un máximo de 27,500 caracteres (contando espacios) que aparecerán en diez páginas de la revista.

Siendo ésta una revista de divulgación científica, se recomienda que las fórmulas matemáticas o nomenclatura demasiado especializada se reduzcan al mínimo. El texto del manuscrito en cuestión tendrá un título y el nombre de los autores con su filiación y dirección electrónica. Podrá contener, además, un resumen, una introducción, los subtítulos necesarios de acuerdo con el tema, las conclusiones y el número necesario de referencias bibliográficas.

Entrega del texto

El texto se entregará en un archivo electrónico vía e-mail, en formato word sin sangrías ni tabuladores.

En el texto se especificará el lugar donde deberán incluirse las figuras.

La lista de los pies de figura se hará al final del texto.

Las figuras se incluirán en un archivo separado con resolución de 300 dpi y 15 cm de lado menor.

Los textos se mandarán a la siguiente dirección electrónica:

revista@iim.unam.mx

El autor responsable de recibir la correspondencia se indicará con un asterisco.

Las referencias se incluirán con el siguiente formato:

Para revistas

- Inicial del nombre y apellido de los autores, "Título del artículo", *Nombre de la revista*, **volumen** (año), página inicial y final.

Para libros

- Inicial del nombre y apellido de los autores, *Título del libro*, país o ciudad, editorial, año.

Ilustraciones

Las fotografías e ilustraciones deberán incluirse en uno de los dos formatos siguientes:

- Originales en papel fotográfico.
- Digitales, con resolución de 300 dpi y 15 cm de lado menor en archivos eps o tiff.

Información adicional:

Enrique Lima Muñoz

Editor responsable de *Materiales Avanzados*

Instituto de Investigaciones en Materiales,

Ciudad Universitaria, UNAM.

04510, México, D.F. México.

Tel. +52 (55) 5622 4640

lima@iim.unam.mx



CONTENIDO



Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. José Narro Robles
Rector

Dr. Eduardo Bárzana García
Secretario General

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Coordinador de la Investigación Científica



Instituto de Investigaciones en Materiales

Ricardo Vera Graziano
Director del Instituto de Investigaciones en Materiales

Enrique Lima Muñoz
Editor Responsable

Comité Editorial
Patricia Guadarrama
Francisco Morales Leal
Ernesto Rivera
Gabriel Torres

Producción
Editorial Terracota, S.A. de C.V.
Edición: Pilar Tapia
Diseño: Rocío Mireles
Formación: Jeanette Vázquez
Ilustraciones: Mayra Alvarado, Martha García

Los editores autorizan la reproducción de los artículos que se publican en **Materiales Avanzados** siempre y cuando se cite la fuente.

Materiales Avanzados, Publicaciones UNAM, es una publicación semestral del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Editor Responsable: Enrique Lima Muñoz. Reserva de derechos al uso exclusivo del título ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública 04-2003-041612533600-102. Certificado de licitud de título 12619, Certificado de licitud de contenido 10191, expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1665-7071. Impreso en Editorial Color, S.A. de C.V., Naranja 96-bis, Santa María la Ribera, 06400, México, D.F., EC0751107320, 55-47-35-40, Distribución Nacional e Internacional: IIM, UNAM, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México, D.F. C.P. 04510 Tel. 5622 4602 Tiraje: 1500 ejemplares.

Agradecemos su colaboración a Jacqueline García y Gilda Castillo y a las fotógrafas Lesly Ivonne Preciado y Ana Luisa Solís, así como a Miguel Reina por sus grabados.

Impreso en México

- 1 Presentación
- 2 Instrucciones para los autores
- 4 Noticias
- 10 Historia y divulgación de la ciencia
Martín Garibay Velasco
- 13 Premio IIM a la mejor tesis doctoral 2011 en ciencia e ingeniería de materiales
Ricardo Vera Graziano y Elizabeth Chavira Martínez
- 17 Grafeno: un material con potencial para la tecnología electrónica del futuro
Claudia Bautista Flores, José Luis Benítez Benítez y Doroteo Mendoza López
- 25 Procesamiento de aleaciones semiconductoras Ga(In)N
M. López-López, M. Ramírez-López, G. Santana-Rodríguez, R. Mendoza-Pérez, J. Aguilar-Hernández, F. de Moure-Flores, L. Zamora-Peredo, V. H. Méndez-García, O. de Melo y J. Huerta-Ruelas
- 33 Hidróxidos dobles laminares: liberadores de moléculas biológicas activas
María de Jesús Martínez Ortiz y Ariel Guzmán Vargas
- 39 Hacia la nanociencia verde: nanomateriales, nanoproductos y nanorresiduos
Carlos Felipe Mendoza y Laura Meraz Cabrera
- 43 Depósito de nanomateriales sobre fibras ópticas
Plácido Zaca Morán



Acoplamiento de nanopartículas

Las nanopartículas de algunos óxidos metálicos se pueden acoplar mediante reacciones de cicloadición, para formar enlaces bien definidos entre las partículas. El acoplamiento se logra al funcionalizar nanopartículas de TiO_2 con grupos alquino y nanopartículas de WO_3 con grupos azida. Las partículas funcionalizadas se acoplaron vía una reacción de ciclo adición catalizada por cobre. En el acoplamiento se forma un enlace triazol que soporta transferencias electrónicas. Esta nueva estrategia de síntesis busca generar materiales con propiedades catalíticas y fotovoltaicas fácilmente modulables. Debido a su estructura electrónica, el TiO_2 , el WO_3 y otros óxidos metálicos son fotocatalizadores. La unión de más de uno de este tipo de óxidos metálicos produce materiales híbridos que incrementan las propiedades de los materiales individuales. Estas nanoestructuras híbridas son un importante avance para entender las bases de la transferencia de carga y pueden ayudar a desarrollar y optimizar celdas solares y fotocatalizadores. *ACS Nano*, **6** (2012), 310-318.



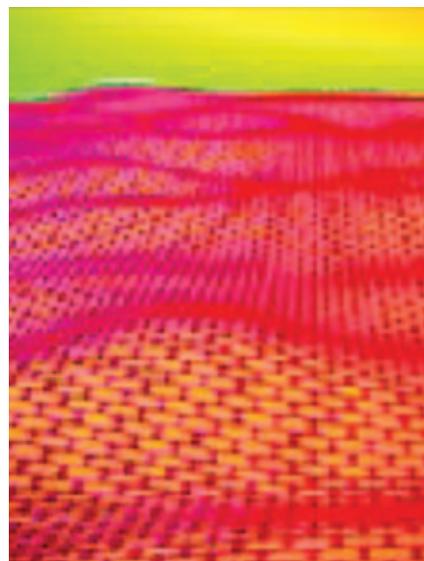
Hacia los sensores ópticos inteligentes

El diseño de estructuras nanoporosas con geometría controlada es una estrategia para desarrollar materiales funcionales. En este sentido, se sintetizaron alúminas anódicas nanoporosas con geometría de poro controlada para modular su fotoluminiscencia y traducirla a un código de barras en la región UV-visible. Las alúminas se prepararon por medio de una síntesis anódica de dos etapas. El sistema de código de barras fotoluminiscente se basa en el código de producto universal. En el sistema, la posición de cada barra corresponde a la longitud de onda de cada oscilación en el espectro fotoluminiscente. Por ejemplo, los códigos de barras con un elevado número de barras (es decir de oscilaciones en el espectro fotoluminiscente) son deseables para desarrollar sensores ópticos en los que se requiere una alta sensibilidad para sondear pequeños cambios externos. Este proceso óptico de código de barras tiene la ventaja de que las alúminas son materiales biocompatibles, térmicamente estables, biodegradables y pueden aplicarse para etiquetar espectroscópicamente cé-

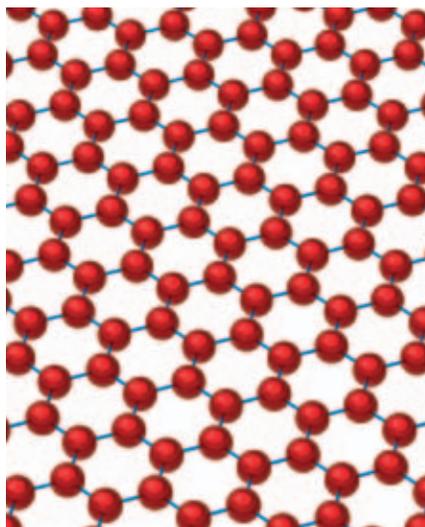
lulas vivas y para desarrollar sensores de biocompatibilidad. *Adv. Mater.*, **24** (2012), 1050-1054.

El grafeno: un material milagroso

El material denominado grafeno fue etiquetado como "la gran cosa" incluso antes de que sus investigadores pioneros ganaran el Premio Nobel el año 2010. Muchos piensan que este descubrimiento puede significar el fin del silicio y que cambiará el futuro de las computadoras y otros dispositivos para siempre. Se considera que el grafeno es el material milagroso del siglo XXI y se ha dicho que es el material más resistente jamás medido, lo que constituye una ventaja significativa, así como el probable desplazamiento del silicio y los materiales más conductores conocidos hasta ahora; sus propiedades se han dado conocer por los diferentes medios y han dado la vuelta al mundo. El grafeno se extrae del grafito y consiste de una serie de capas de carbono sobrepuestas con interacciones enlazantes débiles; se compone de átomos de carbono arreglados de manera hexagonal estrechamente unidos y con un un átomo de espesor. Tres millones de



hojas de grafeno, una sobre otra, tendrían un espesor de 1 mm. La estructura de banda del grafeno fue teorizada y calculada por primera vez por P.R. Wallace en 1947, pero se pensaba que su existencia en el mundo real era imposible. Debido al largo tiempo que pasó hasta su descubrimiento, algunas opiniones de teóricos lo asociaban a los materiales del *crash site* de Roswell. En 2004, algunos equipos de investigación, incluidos los de Andre Geim y Konstantin Novoselov, demostraron que las capas simples podían aislarse, lo que les valió el Premio Nobel de Física en 2010. El grafeno es un muy buen conductor eléctrico y térmico, que puede usarse para desarrollar circuitos semiconductores y partes de computadora. Pruebas mecánicas han demostrado que es increíblemente resistente. El profesor James Hone, de la Universidad de Columbia, afirma que el grafeno es el material más fuerte conocido por el hombre, aproximadamente 200 veces más fuerte y resistente que el acero, pero su potencial no se limita a esto, también puede utilizarse como material compuesto, igual que se usan actualmente las fibras de carbono en electrónica. Ya que no todas sus propiedades han sido descubiertas, más y más científicos han decidido trabajar en este campo. Alrededor de 200 compañías y pequeñas empresas se han involucrado en la investigación del grafeno y en 2010 se publicaron alrededor de tres mil artículos de investigación. Los beneficios tanto para empresarios como para los consumidores son obvios: dispositivos más rápidos que son más delgados y flexibles. En el futuro se podrían ver tarjetas de crédito que tengan tanto poder de procesamiento como un smartphone. Según el profesor Jari Kinaret, de la Chalmers University en Suecia, esto se puede hacer extensivo a nuevas aplicaciones como componentes electrónicos transparentes, flexibles y más rápidos que los de hoy. Samsung ha sido uno de los más grandes inversionistas en investigación so-

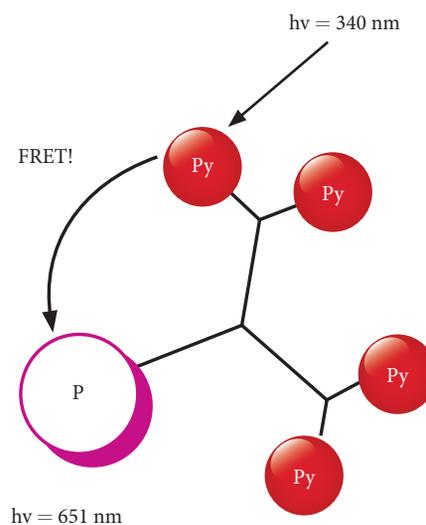


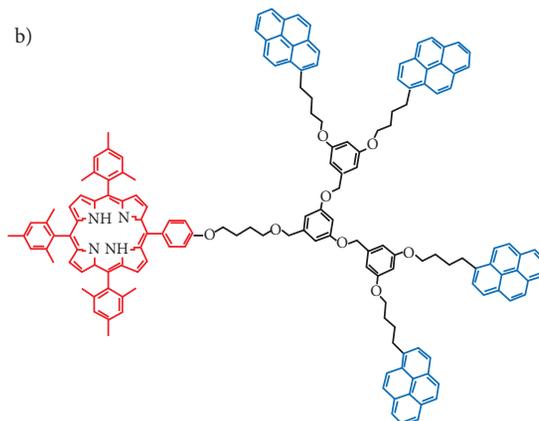
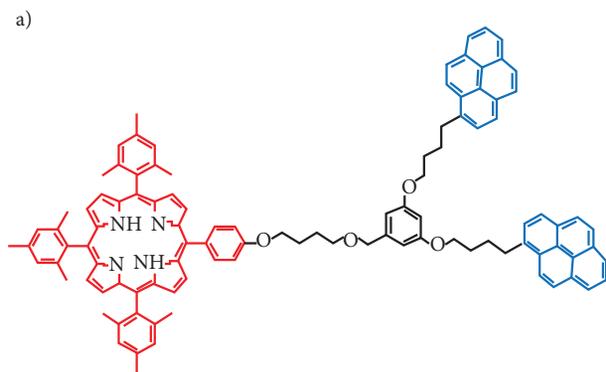
bre grafeno, en colaboración con la South Korean Sungkyunkwan University, no obstante, compañías como IBM y Nokia también se han involucrado en este campo. Ya se ha logrado producir una pantalla digital de 25 pulgadas de grafeno; IBM creó un transistor que opera a una velocidad de 150 GHz, cuando el dispositivo de silicio más rápido corre solamente a 40 GHz. En términos de rapidez de un transistor, actualmente no vemos límites de qué tan lejos podemos llegar. En Europa la investigación sobre este material recibió una inversión de un billón de euros de la Comisión Europea para los próximos diez años. Así, el grafeno se revela como un material prometedor de vanguardia en electrónica, que dejará atrás la época del silicio. *BBC-News-Nature*, 2012.

Materiales dendriméricos para transferencia de energía

Desde su descubrimiento, los dendrímeros han atraído el interés de la comunidad científica debido a sus propiedades únicas. Su uso en dispositivos foto y electroactivos merece especial atención debido a su potencial aplicación en química, medicina y ciencia de materiales. El estudio de las propiedades fotofísicas de los dendrímeros es par-

ticularmente interesante y depende de las arquitecturas de estas macromoléculas. Unidades fotoactivas pueden unirse de manera covalente o no covalente a dendrímeros en diferentes partes: periferia, ramas o núcleo. Dependiendo de la naturaleza de los cromóforos y su localización en la estructura dendrítica, la formación de excímeros y excíplejos, así como procesos de transferencia de energía o *fluorescence resonance energy transfer* (FRET) y transferencia de carga (CT) pueden ocurrir. El estudio de los dendrímeros fotoactivos ha permitido mejorar notablemente la eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas existentes. Se ha sintetizado un gran número de estructuras dendríticas marcadas con diferentes cromóforos seleccionados según sus propiedades fotofísicas. Recientemente se sintetizó una nueva serie de estructuras dendríticas unidas covalentemente con los cromóforos porfirina y pireno, que mostraron una eficiencia FRET sobresaliente, con valores cercanos al cien por ciento. El pireno ha sido ampliamente usado como marcador fluorescente para caracterizar macromoléculas debido a sus propiedades fotofísicas y su habilidad para formar excímeros. Por otro lado, las porfirinas constituyen también una familia muy importante de





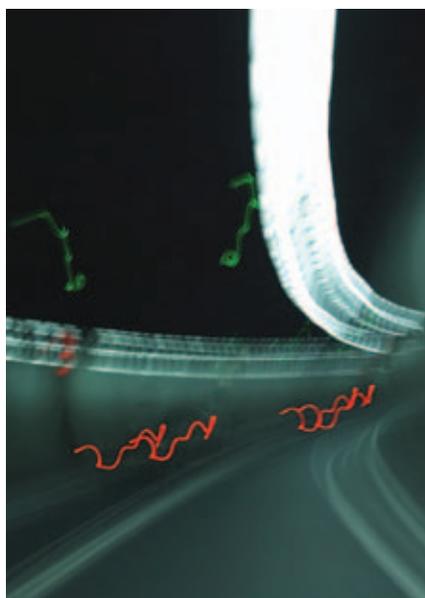
fluoróforos muy estudiada en ciencia de materiales. El diseño de nuevos arreglos porfirínicos y multiporfirínicos es de gran interés debido a su aplicación en catálisis, óptica no lineal (NLO), absorción de dos fotones y alambres moleculares. Varias unidades electro y fotoactivas se han incorporado en las porfirinas para regular sus propiedades electrónicas y fotofísicas. El carácter donador–aceptor de las porfirinas puede modificarse dependiendo de su estado de coordinación y de las unidades fotoactivas unidas a ellas. Entre los primeros trabajos con porfirinas dendronizadas, muy pocos se enfocan al estudio de los efectos de antena captadores de luz y a los efectos de transferencia de energía. Dado que la emisión de pireno (monómero y excímero) se traslapa significativamente con la banda Soret de las porfirinas ($\lambda = 419$ nm para la tetrafenilporfirina o TPP y $\lambda = 423$ nm para su análogo metalado con Zn o ZnTPP), se espera que un fenómeno FRET tenga lugar en compuestos dendríticos marcados con unidades de pireno y porfirina. De hecho, la formación de excímeros de pireno y FRET dependen mucho de la concentración local de pireno y la distancia entre la energía del donador (pireno monómero y excímero) y el aceptor (porfirina). Esto llevó al diseño de nuevas arquitecturas marcadas con porfirina y pireno; así, se sintetizó una serie de dendrones tipo Fréchet de primera y segunda generación con cadenas alquílicas y

grupos 1-pirenil, los cuales se acoplaron posteriormente a una unidad de porfirina en su punto focal vía un espaciador flexible. La estructura de estos compuestos se muestra en la figura. Los espectros de fluorescencia de las porfirinas dendronizadas con pireno mostraron una disminución importante de la emisión de pireno (monómero y excímero), junto con la aparición de una nueva banda de emisión a 661 nm, característica de la porfirina, lo cual revela que un fenómeno FRET transita de un pireno excitado a la porfirina. La eficiencia cuantitativa de FRET fue entre 97 y 99 % dependiendo de la generación de la estructura dendrítica. Dada la alta eficiencia de FRET, estos compuestos, a di-

ferencia de otros previamente reportados, son candidatos potenciales para su futuro uso en dispositivos fotovoltaicos. La combinación de cromóforos porfirina–pireno resultó ser la óptima para esta aplicación. *Langmuir*, **28** (2012), 11195-11205.

Supersólidos

Moses Chan y su alumno Eun-Seong Kim, físicos de la Universidad de Pennsylvania, descubrieron en 2004 una forma supersólida de helio-4 que se produce a 200 mK con todas las propiedades de un superfluido, lo que puede implicar el descubrimiento de un nuevo estado de la materia en el que los átomos se comportan como si fueran sólidos y fluidos a la vez. Si el experimento de los investigadores de Pennsylvania, publicado en la revista *Nature* [427 (2004), 225] llegara a repetirse y a establecerse como definitivo, se confirmaría que los tres estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso) pueden acceder a un nuevo estado, de naturaleza superior, previsto por la condensación de Bose–Einstein, según la cual todas las partículas se condensan en determinadas condiciones en un mismo estado cuántico. El experimento plantea también nuevos interrogantes sobre las fronteras reales del universo cuántico. Los investigadores explican que su material es un sólido porque todos los átomos del helio-4 quedan congelados en una película cristalina rígida, tal como ocurre con



los átomos y las moléculas de un cuerpo sólido normal, como el hielo. Sin embargo, en el caso del helio, esta congelación de los átomos no implica que estén inmóviles. Cuando el helio-4 llega a la temperatura adecuada (apenas un décimo de grado sobre el cero absoluto), la película que forma comienza a experimentar las leyes de la mecánica cuántica. La explicación y la caracterización del fenómeno representan un reto para los científicos tanto teóricos como experimentales. En estudios preliminares realizados por el Premio Nobel Philip Anderson, de la Universidad de Princeton, se encontró que la supersolidificación se puede explicar como una superfluidez de sitios vacantes de una estructura cristalina y sólida de átomos de helio-4. En otro estudio, realizado por Seamus Davis, de la Universidad Cornell, se sugiere que el sólido es más bien un vidrio y no un cristal, o sea es un súpervidrio. Una extensa discusión sobre el problema vidrio o cristal fue hecha por M. Boninsegn en *Supersolids: What and Where are they. Cond-mat.stat-mech*, 11 jan 2012 pp 1-20.

Nanoalambres para detección de emergencias

Investigadores de la Universidad de Tel Aviv desarrollaron un dispositivo basado en nanoalambres de silicio recubiertos con anticuerpos (moléculas que se unen a proteínas específicas), para



capturar ciertas proteínas del torrente sanguíneo que pueden advertir de un inminente ataque cardíaco o de niveles de insulina elevados en sólo unos minutos. La investigación, encabezada por el doctor Patolsky, propone el uso doméstico de este tipo de tecnología en un futuro cercano, para que las personas puedan tomar decisiones en casos de emergencia médica. El dispositivo desarrollado consiste de dos compartimentos pequeños conectados por un canal delgado, en el primero se encuentran los nanoalambres de silicio densamente empaquetados y cubiertos con anticuerpos, el segundo compartimento también contiene nanoalambres de silicio pero en una superficie plana, además sus extremos están conectados a pequeños electrodos. Una vez que se recubren ambos grupos de nanoalambres con anticuerpos, se vierte una gota de sangre (50 a 250 microlitros) al primer compartimento. Luego de un tratamiento en ese compartimento, se pasa una muestra "depurada" al segundo, en donde, debido a una lectura de cambio de corriente, se puede determinar cuánta proteína relacionada con cierta enfermedad está presente en sangre. *Nano Letters*, 2012.

Espines controlados por cubiertas termoeléctricas

Recientemente se encontró que el voltaje generado en el efecto Seebeck puede estar formado por electrones con un mismo tipo de espín. Esto es posible si se produce un gradiente de temperatura en un material magnético, lo que se conoce como efecto Seebeck de espín (ESS). Este efecto se ha estudiado en un dispositivo formado por un sustrato de $Ga_3Ga_5O_{12}$, granate de gadolinio galio (GGG), sobre el que se deposita un granate de hierro itrio con sustituciones de itrio por bismuto, $BiY_2Fe_5O_{12}$ (Bi:YIG), sobre éste se deposita una capa de platino. Las dimensiones del sustrato son 5×2 mm de área y un espesor de 0.7 mm, mientras que el espesor del Bi:YIG es de 60 nm y el espesor de la capa de Pt es de 10 nm. Al producir un gradiente de temperatura entre el sustrato y la capa de Pt se detecta una corriente de espines que fluye perpendicular a la superficie del dispositivo, como resultado del ESS. Es importante señalar si hay un efecto de arrastre por fonones desde el sustrato que aumenta la corriente. Este tipo de dispositivos ofrece grandes expectativas para distintas aplicaciones, pues se obtuvo que el cambio de voltaje medi-





do respecto del gradiente de temperatura aplicado es de $0.82 \mu\text{VK}^{-1}$, estimándose que se pueden alcanzar valores del orden de mVK^{-1} . *Nat. Mater.*, **11** (2012), 686.

Propiedades electromecánicas del grafeno

El comportamiento electromecánico de las capas de grafeno que flotan en una cavidad se estudió mediante microscopía y espectroscopia de barrido de tunelaje. Los dispositivos se prepararon usando un sustrato de SiO_2/Si en el que se fabricaron cavidades de $1.1 \mu\text{m}$ de diámetro y 100 nm de profundidad. Sobre las cavidades se depositaron monocapas de grafeno obtenidas por exfoliación mecánica, sobre las que se depositaron electrodos de Pd/Au. Los experimentos se realizaron a 4 K y alto vacío. La topografía realizada sobre el grafeno muestra que se produce una deformación notable en la región en donde se encuentra la cavidad, que depende del voltaje de compuerta aplicado sobre el soporte de Si. Considerando solamente la diferencia de potencial entre la membrana y la punta del STM, en el rango de $\pm 1 \text{ V}$, y la fuerza electrostática, se produce muy poco efecto en la forma de la membrana. Esto implica que la fuerza de Van der Waals entre la punta de prueba y la membrana de grafeno es la

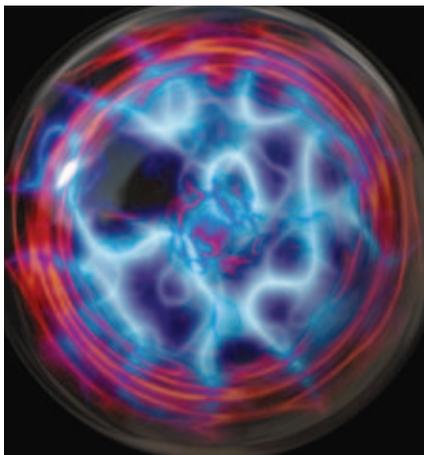


responsable de la deformación. La espectroscopia de tunelaje, curvas de dI/dV (I es la corriente de tunelaje) como función del voltaje de polarización (V), muestran una estructura similar a la observada en puntos cuánticos. Tanto la topografía como la espectroscopia observada en grafeno que flota sobre una cavidad son muy diferentes del comportamiento observado en el grafeno soportado por un sustrato. *Science*, **336** (2012), 1557.

Cómo caminar en el agua

Si se vierte suficiente fécula de maíz en una piscina, se puede caminar sobre la superficie del agua. Al contacto firme con el pie, las partículas en suspensión en el agua se aglomeran como nieve acumulada delante de una máquina quitanieves. La compactación forma un parche duro que puede empujar hacia atrás con la misma cantidad de presión concentrada en la punta de un tacón alto, informaron investigadores de la Universidad de Chicago, encabezados por el profesor Scott Waitukaitis. Un fluido no newtoniano no se comporta como un líquido normal. Un estímulo suave permite el deslizamiento sin mucha resistencia, pero un golpe a la superficie resulta en una fuerza equivalente pero en sentido contrario. Para comprender las fuerzas involucradas, los investigadores golpearon

la mezcla con una varilla de metal y monitorearon las repercusiones. En experimentos previos se había frotado el material entre dos placas (una técnica común para probar las propiedades de los líquidos), considerando fuerzas de corte en lugar de impacto directo. Las radiografías del lodo opaco que se genera revelan cómo la materia se mueve debajo de la superficie. Simulaciones basadas en los datos sugieren que el impacto inicial saca el agua fuera de los espacios entre las partículas, luego, la fricción entre las partículas hace el resto. Las partículas se mantienen juntas y forman un frente expansivo que se comporta como un sólido que presiona contra la varilla metálica. Los investigadores esperan que la comprensión del comportamiento de este tipo de fluidos sienta las bases para confeccionar chalecos antibalas "líquidos" mediante la inmersión de Kevlar en suspensiones similares, aunque advierten que lo que ocurre en una suspensión no necesariamente ocurre en otra. A pesar de décadas de estudio, todavía nadie entiende por qué las suspensiones como la fécula de maíz se espesan cuando se perturban, y las arenas movedizas o la salsa de tomate se adelgazan, a pesar de que en todos los casos se trata simplemente de partículas suspendidas en líquidos. *Nature*, julio 2012.



No te preocupes



Seguimos trabajando

La Calidad, Nuestro Compromiso,
Nuestro objetivo, el Medio ambiente.



La marca mas avanzada en sistemas de conducción

agua • drenaje sanitario • drenaje pluvial • fibra óptica • cableado • minería

Oficinas Corporativas y Planta Noreste

Carretera Villa de García
km. 0+800 C.P. 66370
Sta. Catarina Nuevo León, México.

Planta Centro

Calle Parque No. 10,
Parque Industrial Jilotepec,
Jilotepec, Edo. de México

Planta Pacífico Norte

Calle 2, Carretera México 15,
Km. 177+900
Ruiz Cortines, Guasave, Sinaloa

Exige tu Servicio Integral

ADS Mexicana, con sus más de **40,000 kilómetros** de tubería corrugada de polietileno de alta densidad instalada en el territorio nacional, reafirma su compromiso con el medio ambiente, garantizando el bienestar y desarrollo de las **Familias Mexicanas.**

ADS
MEXICANA

ADS MEXICANA, S.A. DE C.V.

Tel. 01 81 8625 4500 al 05

Fax: 01 81 8625 4541

info@adsmexicana.com

www.adsmexicana.com

Historia y divulgación de la ciencia

Martín Garibay Velasco

Esta reseña compara las lecturas de *De la alquimia a la química* y *Átomo, viaje a través del cosmos subatómico*, ambos de divulgación científica. El primero fue escrito y publicado en México por Teresa de la Selva, maestra titular en la UAM y doctorada en física por la UNAM, y el segundo es parte de una extensa obra literaria del reconocido escritor estadounidense de ciencia y ciencia ficción, Isaac Asimov.

El tema que tratan estos dos autores es similar, sin embargo hay una gran diferencia en la forma en de presentarlo. Teresa de la Selva habla, como lo dice el título de su libro, de lo que era la alquimia, de cómo y quiénes la practicaban y de los pasos que se siguieron hasta el arribo a la química como ciencia. Para esto echa mano de pequeñas historias y personajes inventados que se adecuan a lo que aconteció realmente, con el fin de dramatizar y amenizar la lectura. Por supuesto incluye también los datos originales que históricamente dieron paso a los sucesivos niveles de conocimiento, pero sin hacer gran hincapié en el rigor experimental que fue necesario en el marco contextual de la época, ni en la distinción entre la narración imaginaria y la de los acontecimientos reales.

Por su parte, Isaac Asimov habla también de la evolución del conocimiento a través de la experimentación científica, pero desde un enfoque simple de acontecimientos y científicos que de hecho existieron, en donde resalta un encadenamiento cronológico meticuloso, mismo que funge como elemento principal para amenizar la historia. Asimov lleva de la mano al lector a través de una línea temporal donde cada paso es explicado y cada hueco es aclarado. Cada reacción y cada proceso que es necesario conocer mínimamente para entender los resultados son presentados, a veces retrocediendo para poder avanzar sin por esto revolver las cosas. De una manera limpia, este autor parte de las posturas lógicas planteadas por los filósofos griegos clásicos y llega a la mecánica cuántica, las interacciones entre las fuerzas naturales y el principio del universo, pasando por las reacciones químicas y nucleares que dieron origen a tales fenómenos, con un gran detalle difícil de alcanzar sin recurrir al lenguaje científico.



Para ser justos, es importante señalar otra diferencia entre ambos textos, pues aunque sí son lo suficientemente cercanos en lo que se refiere a la temática como para ser comparados, no se pueden juzgar partiendo de un mismo principio. Uno de ellos, *De la alquimia a la química*, introduce cierto aspecto filosófico sobre el proceder humano, así como una visión cultural del razonamiento científico. Por ejemplo, la diferencia entre la matematización del movimiento de un péndulo, que es generalizable y comprensible mediante experimentos simples y macroscópicos, y la razón de ser de las propiedades cualitativas de un material en comparación con otro, problema que requiere mucho más que un estudio lógico, abre las puertas a suposiciones filosóficas y permite proponer respuestas que inevitablemente se ven influidas por el bagaje cultural de quien las medita y su circunstancia. El otro libro, en cambio, busca mostrar los datos duros históricamente aceptados, desde una perspectiva casi puramente científica, con algunas aportaciones reflexivas del autor y con una elegancia que le impide caer en el tedio al que este tipo de escritos se arriesga al estar dirigido al público no científico.

Precisamente por sus diferencias, las dos lecturas podrían parecer un buen complemento la una de la otra, sin embargo en mi opinión no lo son tanto. Cuando se lee el libro de Asimov no se extraña la ficción ni ninguna trama novelesca, el texto da la impresión de estar completo por donde se vea y genera interés mientras más se avanza, como si se tratase en efecto de una

historia en la que cada nuevo descubrimiento es un pequeño desenlace que activa otra historia más y todas fueran dirigidas hacia un punto común, entrelazadas con el objetivo de comprenderlo todo, avivando de este modo cada capítulo y provocando la avidez de quien ya tiene un interés por el funcionamiento de la física y la química, o incluso de quien ha sido renuente a comprender los complicados esquemas de la ciencia y toma el libro sin un conocimiento previo notable.

Esto podría parecer una crítica un poco parcial en favor de un autor, pero a pesar de mi admiración por la obra de Asimov, estoy consciente de lo fácil que puede ser perder

objetividad y permitir que una postura anterior influya en cualquier juicio, por lo que intento ser lo más neutral posible. No obstante, es para mí un hecho que el libro de Teresa de la Selva tiene un valor divulgativo, pero con una intención que no se cumple. No es fácil introducir al público general en temas históricos y menos aún si son científicos, y aunque a conciencia plena se intenta llevar por este camino la obra, la dinámica de la misma resulta confusa; para el seguimiento de cada capítulo se requiere, de entrada, tener un interés específico por el tema y estar familiarizado con él. Parte de esta dinámica es utilizar palabras en desuso que hacen referencia a ciertas sustancias y símbolos extraños que resultan engorrosos al intentar dar seguimiento a las reacciones que se ejemplifican. Al mismo tiempo ocurren saltos de secuencia entre una historia y otra. Por estas razones no es una lectura que pueda entender cualquier persona, hay capítulos que no parecen estar hilados en absoluto con los anteriores, no genera demasiada expectativa, es algo confusa y no ahonda en ningún tema, dejando muchas preguntas en el aire, pero sin siquiera permitir al lector plantearse con claridad cuáles son esas preguntas sin respuesta.

En cuanto a las opiniones que Teresa de la Selva expone al final y al principio de cada capítulo, en general estoy de acuerdo con ellas, pero me parece que le falta profundizar más en ese aspecto. Por ejemplo, en una sección del cuarto capítulo, está por terminar de hablar sobre cuestiones alquimistas y dice: “¿Se dirá entonces que la alquimia fue inútil? No, no es para tanto. Por un lado está el adelanto tecnológico innegable sobre el conocimiento de la manufactura de toda clase de materiales; por otro, el valor de la búsqueda de la transmutación, que si bien tiene carácter negativo, dejó el terreno preparado para la creación de la química como ciencia”.

Me parece una postura que podría ser ampliada cediéndole más importancia al tema de “qué tan importante fue realmente la alquimia y qué tipo de importancia tuvo”. Este comentario, además de breve, carece de contenido innovador, cuando podría esperarse mucho más dado que es una de las cuestiones principales del libro; es una conclusión que podría ser fácilmente repetida por una persona menos docta en la materia, no tiene trascendencia y a mi parecer habría sido un buen lugar para introducir una crítica más valiente, que incluya por ejemplo el atraso que la pretensión alquimista pudo haber representado para la química como tal, el lastre que posiblemente no permitía una verdadera comprensión de la materia. Por supuesto que en algún momento tenían que cesar los intentos infructuosos por lograr lo que sea que se buscara por medio de la alquimia (la transmutación de los elementos en oro, el elixir de la vida, etc.), dando paso a otro tipo de métodos y maneras de pensar, lo que es ahora la química, pero es muy fácil encon-

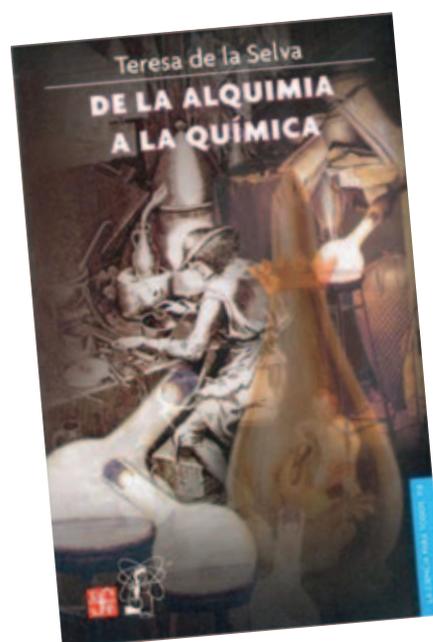
trar razones por las cuales, más que dejar preparado el terreno para la química como ciencia, la alquimia lo retrasó hasta agotar sus artificios, ya sea bien o mal intencionados.

En otro párrafo, después de hablar sobre Lavoisier y describir algunos de sus experimentos y resultados, menciona sin mucha contundencia la intención de este personaje de poner la química por encima con el título de ciencia. Hasta ahí se quedaría quien, sin mucho conocimiento, termina de leer el capítulo, pero la importancia de Lavoisier para esta ciencia me parece que debe ser puntualizada con mayor claridad, no por nada es conocido como el “padre de la química”.

Para concluir quiero decir que es importante la lectura de ambos libros y ambos estilos, más que por el contenido de cada uno de ellos, por la diferencia en la forma en que se muestran y perciben las ideas; este contraste que se aprecia entre los dos es una gran herramienta para ampliar la perspectiva desde la que se critica un texto. Para tener bases sólidas y mejor fundamentadas a la hora de decidir qué tipo de libros son los más indicados para cada uno de nosotros, los que con mayor facilidad podrán acercarnos a diferentes temas y generar un impacto profundo, sirve hacer este tipo de comparaciones, con las que definimos una inclinación hacia cierto tipo de escritos (científicos o literarios), y con esto ayudamos a fomentar y mantener en nosotros mismos un interés atractivo y constante por el aprendizaje.

Isaac Asimov, *Átomo, viaje a través del cosmos subatómico*, Barcelona, Plaza y Janés, 1992.

Teresa de la Selva, *De la alquimia a la química*, México, Fondo de Cultura Económica, 1998.



UNAM POSGRADO

Ciencias e Ingeniería de Materiales



La Universidad Nacional Autónoma de México
a través del Programa de Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales
CONVOCA

A los aspirantes que estén titulados y/o graduados de estudios de Licenciatura
y/o Maestría a ingresar en el semestre 2013-2, el cual iniciará
el 28 de enero de 2013, a los siguientes planes de estudios:

- DOCTORADO EN CIENCIA E INGENIERÍA MATERIALES
- MAestrÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Acreditados como posgrados en Calidad Internacional en el Padrón
Nacional de Posgrados de Calidad del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

En el programa participan las Entidades Académicas

- Facultades de Ciencias
- Facultad de Química
- Facultad de Ingeniería
- Instituto de Física
- Instituto de Investigaciones en Materiales
- Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico
- Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada Juriquilla, Querétaro
- Centro de Investigación en Energía Temixco, Morelos
- Centro de Nanociencias y Nanotecnología Ensenada, Baja California

Los aspirantes deberán cumplir con los requisitos de ingreso establecidos
en el plan de estudios descritos en la convocatoria de ingreso, publicada en la dirección electrónica:

<http://www.posgrado.unam.mx/pceim>

Fechas importantes a considerar:

Registro de aspirantes: del lunes 3 de septiembre al viernes 19 de octubre de 2012

Publicación de resultados: Lunes 7 de enero de 2013

Inscripción Oficial a la UNAM: Maestría: del lunes 14 al miércoles 16 de enero de 2013

Doctorado: jueves 17 y viernes 18 de enero de 2013

Preguntas, comentarios e información complementaria: coordinación del Programa: 5622 4731
5622 4730

correo electrónico: pceim@posgrado.unam.mx

Premio IIM a la mejor tesis doctoral 2011 en ciencia e ingeniería de materiales

Ricardo Vera Graziano y Elizabeth Chavira Martínez

Creado en 1995 por el Instituto de Investigaciones en Materiales, este premio tiene el propósito de estimular la formación de recursos humanos de alta calidad en el área de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Los premios del certamen 2011 a la mejor tesis doctoral en el área de Ciencia e Ingeniería de Materiales se presentaron en la ceremonia que tuvo lugar en el Auditorio del Instituto de Investigaciones en Materiales el día 22 de agosto del presente año a las once de la mañana. Se contó con la presencia del doctor Miguel Lara Flores, Secretario Académico de la Coordinación de la Investigación Científica, en representación del doctor Carlos Arámburo de la Hoz, Coordinador de la Investigación Científica.

Con base en el dictamen del jurado, se anunciaron dos ganadoras, la doctora María Teresa Guzmán Gutiérrez y la doctora Zenaida Carolina Leyva Inzunza y una mención honorífica al doctor Sinhué López Moreno.

María Teresa Guzmán Gutiérrez presentó su tesis “Nuevos polímeros obtenidos a partir de fluorocetonas y anillos aromáticos”, con la que obtuvo el grado de doctora en Ciencias Químicas el día 30 de marzo de 2011, en el programa de Posgrado en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional Autónoma

de México, bajo la dirección del doctor Mikhail Zolotukhin.

Compartió el premio con Zenaida Carolina Leyva Inzunza quien, con la tesis “Synthesis of Catalysis with Moderate Acidity for Selective Hydrocracking of Heavy Crude Oils”, obtuvo el grado de doctora en Ciencias el 14 de enero de 2011, de la Dirección de Investigación y Posgrado del Instituto Mexicano del Petróleo. La dirección de su tesis estuvo a cargo de los doctores Jorge Ancheyta Juárez y Jorge Fernando Ramírez Solís.

Las ganadoras recibieron un diploma y un premio en metálico a dividir de 25 salarios mínimos mensuales vigentes en el Distrito Federal.

También los directores de las tesis premiadas —Mikhail Zolotukhin, Jorge Ancheyta Juárez y Jorge Fernando Ramírez Solís— recibieron un estímulo, en esta ocasión se les hizo entrega de un diploma y un premio en efectivo a repartir de 10 salarios mínimos mensuales vigentes en el Distrito Federal.

La mención honorífica fue otorgada a Sinhué López Moreno, por la tesis titulada “Transiciones de fase estructurales inducidas por presión desde primeros principios”. La dirección de la tesis estuvo a cargo del doctor Aldo Humberto Romero Castro.

El jurado calificador de este decimosexto certamen estuvo integrado por:



Miguel Reina, Collage, grabado.

Dr. Federico Humberto Barceló Santana, FO-UNAM.

Dra. Guillermina Burillo Amezcua, IN-UNAM.

Dra. Judith Cardozo Martínez, UAM-I.

Dr. Sergio Fuentes Moyado, CNYN-UNAM.

Dr. Ignacio Luis Garzón Sosa, IF-UNAM.

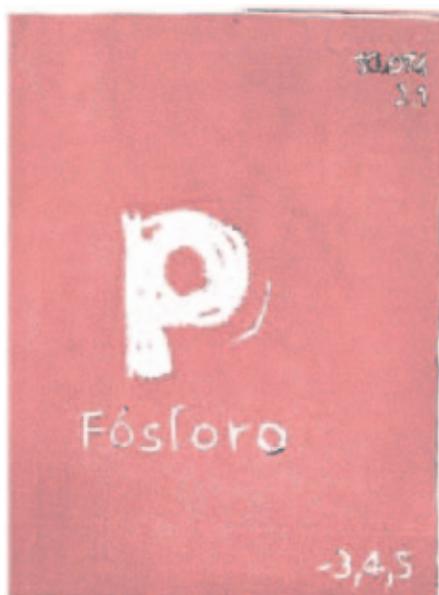
Dr. José Saniger Blesa, CCADET-UNAM.

Dra. Martha Elena Sosa Torres, FQ-UNAM.

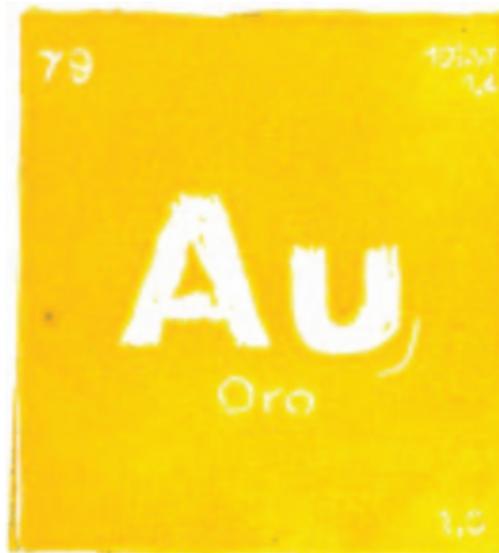
A continuación se presentan los resúmenes de las tesis galardonadas.

Nuevos polímeros obtenidos a partir de fluorocetonas y anillos aromáticos, de María Teresa Guzmán Gutiérrez

La creciente demanda de tecnología moderna y de producción de los materiales, la economía y las restricciones ambientales hacen de la investigación en el área de la química de polímeros una parte esencial y necesaria de nuestra vida. En gran medida se relaciona con el problema de desarrollo de métodos de síntesis simples, versátiles, eficaces y baratos para polímeros funcionales y de alto procesamiento. Esta continua demanda de nuevos materiales poliméricos con una única combinación de propiedades ha llevado a la investigación por el camino de la incorporación y modificación de la estructura del material. Este avance condujo al desarrollo de nuevos polímeros fluorados aromáticos, que presentan propiedades químicas y físicas únicas, además de un alto desempeño que no se observa en otros polímeros orgánicos.



Miguel Reina,
Fósforo, grabado,
2012.



Miguel Reina, *Oro*, grabado, 2012.

En este proyecto se desarrolló la metodología científica para lograr la síntesis regioselectiva de nuevos polímeros a partir de fluorocetonas e hidrocarburos aromáticos. La ruta de reacción consiste en la condensación catalizada por superácidos de las fluorocetonas con anillos aromáticos desactivados, también llamada hidroxialquilación superelectrofílica. Se descubrió un efecto al cambiar la alimentación no estequiométrica de los monómeros, es decir el efecto de los monómeros, donde se observa un cambio dramático en la velocidad de reacción, ya que se completa en pocos minutos, así como en el incremento en el peso molecular del polímero. También se encontraron las condiciones de reacción para la disminución en la formación de macrocíclicos en las reacciones de policondensación, los cuales son el obstáculo principal para la formación de polímeros lineales de alto peso molecular.

Todos los polímeros sintetizados son solubles en disolventes orgánicos típicos y tienen la capacidad de formar películas flexibles y resistentes. Se encontró que la T_g podía variar de 122 °C hasta arriba de 400 °C y la temperatura de descomposición desde 259 °C hasta 529 °C. Además, por primera vez se obtuvo un polímero con ultra alto peso molecular ($M_w = 1.072 \times 10^6$; $M_n = 0.613 \times 10^6$). Con las condiciones óptimas de reacción se lograron obtener 47 nuevos polímeros con fluorocetonas y compuestos aromáticos, que son solubles y pueden formar membranas resistentes.

Por último, se probaron las propiedades de transporte de gases de 16 nuevos polímeros y se encontraron propiedades muy prometedoras en el área de la tecnología de membranas al mostrar eficiencia en la separación de gases.

Synthesis of Catalysis with Moderate Acidity for Selective Hydrocracking of Heavy Crude Oils (Síntesis de catalizadores con acidez moderada para la hidrodeseintegración selectiva de crudos pesados), de Zenaida Carolina Leyva Inzunza

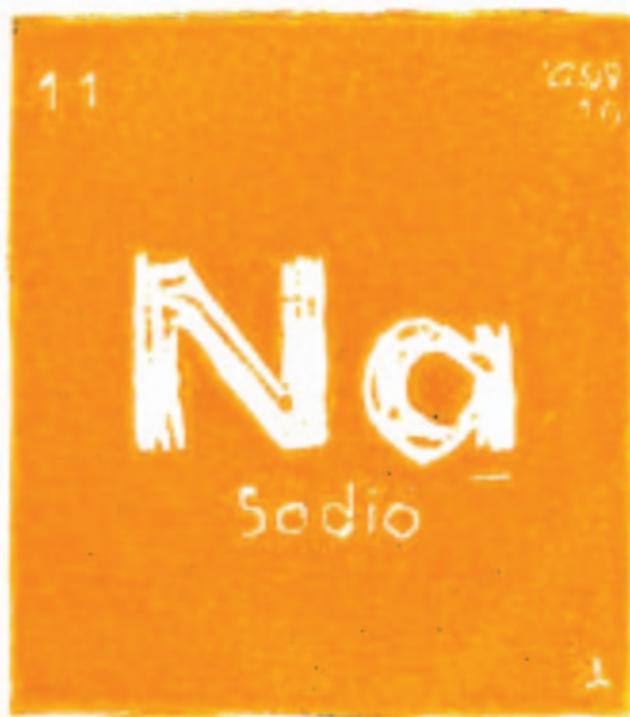
Esta tesis doctoral aborda el diseño, síntesis, caracterización, evaluación y aplicación de materiales catalíticos soportados en sílice-alúmina variando la composición del soporte para obtener diferente acidez y propiedades texturales en catalizadores para la industria del petróleo que los empleará en la hidrodeseintegración de crudos pesados.

Los catalizadores preparados contienen níquel y molibdeno depositados en soportes de sílice-alúmina con composición de 5, 10, 25, 50 y 75 % de peso de sílice. Estos materiales se caracterizaron mediante infrarrojo con adsorción de piridina y monóxido de carbono, adsorción y desorción de nitrógeno, resonancia magnética nuclear, absorción atómica, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y transmisión de alta resolución, reducción a temperatura programada y espectroscopía Raman.

El análisis de las propiedades texturales de los materiales indica que a medida que el contenido de silicio se incrementa el área superficial específica disminuye, este comportamiento es contrario al diámetro promedio de poro y al volumen total de



Miguel Reina, *Litio*, grabado, 2012.



Miguel Reina, *Sodio*, grabado, 2012.

poro, los cuales se incrementan en composiciones elevadas de silicio, promoviendo la formación de estructuras meso y macroporosas. Mediante infrarrojo se determinó que la cantidad de silicio empleada promueve la formación de sitios ácidos de naturaleza y fuerza distintas (Brønsted y Lewis), así como grupos OH en la superficie de los soportes. Se estableció que los sitios ácidos se forman debido a la generación de cargas en exceso generadas por la incorporación de cationes de aluminio en la sílice, y que la fuerza de estos sitios está relacionada con la cantidad de átomos de aluminio así como con su estado de coordinación. Se encontró que la promoción de las fases sulfuradas de los metales activos en cada catalizador no se favorece con contenidos altos de sílice. La actividad catalítica con crudo pesado para cada reacción de hidroprocesamiento se favorece por distintas propiedades de los materiales. Para la reacción de hidrodeseintegración es necesario un número de sitios activos correspondiente a la fase sulfurada que se desfavorece con el incremento de sílice en el soporte. Para la hidrodeseintegración se requiere combinar una dispersión óptima de sitios activos y una acidez moderada. Para la hidrodeseintegración e hidrodeseintegración es necesario un equilibrio entre la acidez y las propiedades texturales para favorecer la difusión de moléculas grandes (asfaltenos) que tienen contenidas a las porfirinas de vanadio y níquel, y el rompimiento de estas moléculas.

Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica

El Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (LUME) surge como parte del programa de creación de Laboratorios Universitarios de Investigación impulsado por la UNAM con el objetivo de unir los esfuerzos del personal académico para la compra de equipos de alta demanda y costo, con el fin de hacer un uso más racional de los equipos y fortalecer la vinculación de la red de investigación de nuestra Universidad, y como parte esencial de los esfuerzos de renovación de la infraestructura para realizar investigación contemplada en el Plan de Desarrollo de la UNAM, así como el Proyecto Institucional de Renovación de Infraestructura aprobado por el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) en su Plan de Desarrollo 2009-2012, el cual incluye equipos, laboratorios e instalaciones.

Para la apertura del LUME, se contó con el esfuerzo y participación institucional de las siguientes entidades de la UNAM: la Coordinación de la Investigación Científica, el Posgrado en Ciencia e Ingeniería en Materiales, el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, el Instituto de Ingeniería y la Facultad de Química, quienes participan con proyectos interdisciplinarios y con fondos concurrentes para la consolidación del LUME.

Cabe destacar también que el LUME es un laboratorio de gran importancia en la formación de recursos humanos, ya que un número significativo de estudiantes de posgrados afines a la Ciencia e Ingeniería de Materiales (Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ciencias Físicas, Ciencias Químicas y Ciencias Médicas) se ven beneficiados con el uso de este laboratorio, tanto en la realización de sus proyectos de investigación como en su capacitación en técnicas de observación microestructural y analíticas de última generación. Por otro lado, la apertura y equipamiento del LUME permite al IIM participar en mejores condiciones en los servicios de apoyo y asesoría tecnológica para las empresas que requieren análisis relacionados con la caracterización microestructural de materiales por microscopía electrónica.

El LUME tiene como objetivo científico la caracterización estructural a nivel micrométrico y nanométrico de los materiales así como realizar estudios de análisis estructural por difracción de electrones, análisis químico por fluorescencia de Rx, análisis de morfología y microestructura por Microscopía Electrónica.

Actualmente dispone de los siguientes equipos:

- Microscopio electrónico de barrido SEM Jeol 7600.
- Unidad de micromaquinado por haz de iones JEM-9320.
- Microscopio electrónico de barrido Leica-Cambridge con detector EDS y WDX para análisis químico y con presentación de imágenes bajo ambiente windows y OIM para textura.
- Microscopio electrónico de transmisión JEOL 1200EX, con detector EDS para análisis químico, detector EELS para elementos ligeros, capa de televisión y sistema de barrido.
- Adelgazador iónico Edwards E306A.
- Adelgazador por ataque electroquímico Struers Tenupol-3.
- Adelgazador mecánico Gatan 656.



Grafeno: un material con potencial para la tecnología electrónica del futuro

Claudia Bautista Flores,* José Luis Benítez Benítez y Doroteo Mendoza López, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

Aspectos generales

El carbono es uno de los principales elementos que conforman la vida. En la naturaleza se puede encontrar en dos formas alotrópicas: diamante y grafito, estas formas tienen propiedades muy diferentes a pesar de estar formadas exclusivamente por carbono. Lo que constituye la diferencia es la forma en la que están ordenados los átomos en cada representación. En 1985 se encontró otra forma peculiar del carbono, los fullerenos, que son moléculas esféricas formadas por pentágonos y hexágonos de átomos de carbono. En 1991, S. Iijima descubrió otra forma del carbono, los nanotubos, que son monocapas o multicapas de grafito enrolladas, de tal manera que forman un tubo. Otra nueva forma es el grafeno, que es un arreglo hexagonal bidimensional o red de panal de átomos de carbono, es decir una sola capa de grafito con 0.34 nm de grosor, material del cual hablaremos en este artículo (figura 1).

Se creía que el grafeno, por ser un material bidimensional, no podría existir aislado del grafito en bulto, pero el interés en el material es grande. En 1947 P.R. Wallace realizó un estudio teórico sobre la estructura de bandas del grafeno. Por otra parte, para sintetizarlo se intentó la exfoliación química, que con-

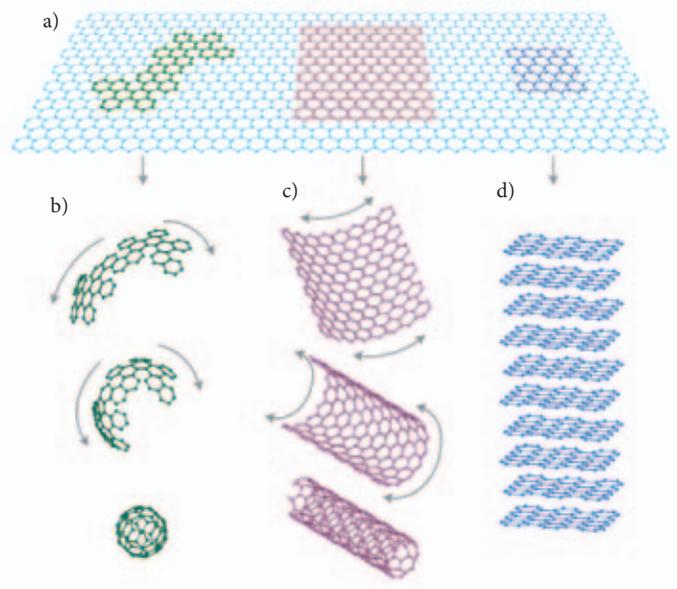
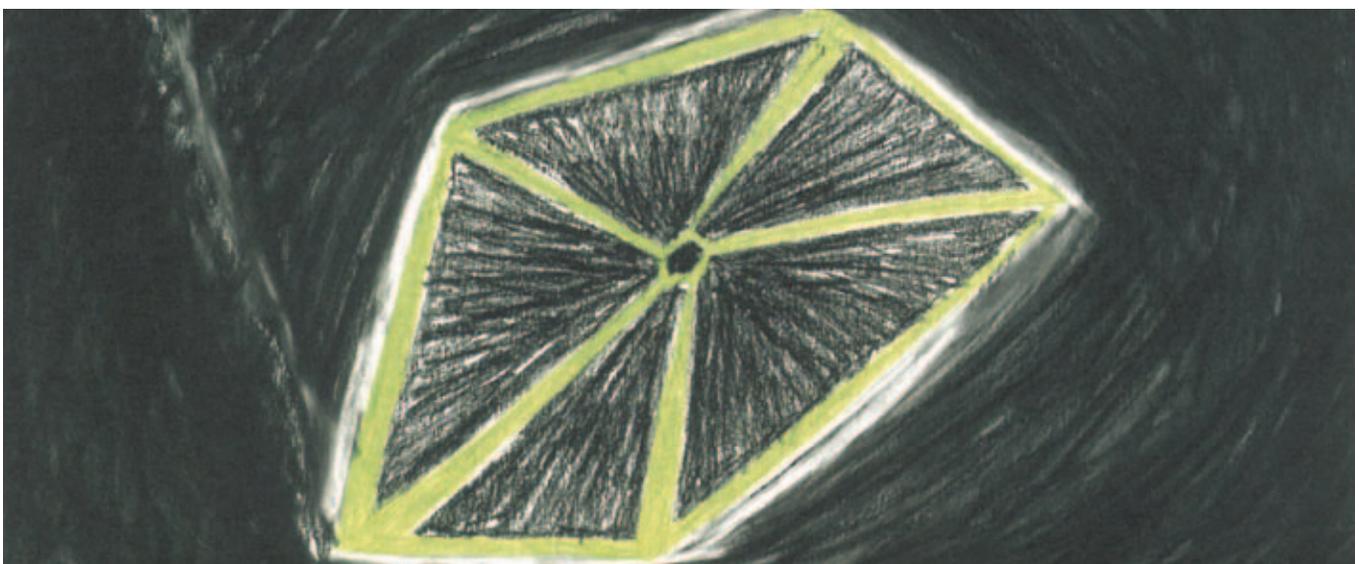


Figura 1. a) Grafeno, b) fullereno, c) nanotubos, d) grafito.¹



Jacqueline García, C⁶, poema gráfico, 2012.

siste en insertar moléculas que sirven como cuñas entre los planos de grafito para tratar de separarlo en capas muy delgadas (intercalación). Se frotaron obleas de grafito contra otras superficies, con lo que se obtuvieron películas de hasta cien planos atómicos. Hasta que Konstantin Sergeevich Novoselov y Andre Konstantin Geim se dieron cuenta, en 2004, de que usando cinta adhesiva para exfoliar pequeñas hojuelas de grafito se separaban tan fácilmente las delgadas capas de grafeno, que posteriormente, al ser colocadas en el sustrato adecuado, en su caso una capa de óxido de silicio sobre silicio, era posible observar tanto monocapas como multicapas de grafeno (MdG) en un microscopio óptico.² Esta sencilla técnica es hoy conocida como exfoliación mecánica de grafito. Por este hallazgo y por la investigación posterior que el grupo ha realizado sobre el grafeno, Novoselov y Geim fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 2010.

Este material, hasta el momento el más delgado conocido en la naturaleza, tiene propiedades asombrosas. El grafeno es un semimetal, pues las bandas de conducción y valencia se tocan en un solo punto y el nivel de Fermi pasa justo por este punto; esto es, el grafeno no tiene una banda prohibida (figura 2),³ y esto permite que los electrones en el material puedan pasar sin ningún problema de la banda de valencia a la banda de conducción. Posee una conductividad mínima⁴ de:

$$\frac{4e^2}{h} \approx 1.5 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$$



Jacqueline García, C⁶, poema gráfico, 2012.

Otro aspecto muy importante del grafeno es que, en la vecindad de los puntos de Dirac, los portadores de carga se propagan con una masa efectiva igual a cero, el movimiento de estas cuasipartículas está descrito por una ecuación tipo Dirac³ y la velocidad de Fermi asociada⁵ es de:

$$v_F = 1 \times \frac{10^6 m}{s}$$

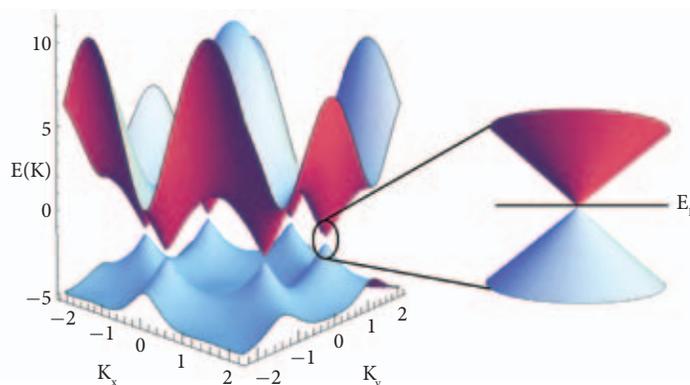


Figura 2. Estructura de bandas del grafeno, donde $E(k)$ es la energía como función del vector de onda $k = (k_x, k_y)$. En el acercamiento se aprecian los puntos de Dirac: las bandas de valencia y conducción se tocan en esos puntos y coinciden con la energía de Fermi E_F .

La movilidad de los portadores de carga es de 15 000 cm²/Vs a 300 K y 60 000 cm²/Vs a 4 K, para muestras soportadas en sustratos, y de 200 000 cm²/Vs para muestras suspendidas a temperatura ambiente. La movilidad es menor para muestras soportadas por sustratos debido a la interacción entre ambos, lo cual afecta la dinámica de los portadores en el grafeno. En comparación, el silicio y el arseniuro de galio tienen movilidades de 1500 cm²/Vs y 8500 cm²/Vs respectivamente. La conductividad térmica para el grafeno también es muy alta, de aproximadamente 5000 Wm⁻¹K⁻¹ a temperatura ambiente. Puede soportar densidades de corriente seis órdenes de magnitud más que el cobre. La alta conductividad eléctrica se debe a los grandes valores de la movilidad eléctrica y su excelente conductividad térmica, a que los enlaces entre los átomos de carbono son muy fuertes, de tipo covalente y a las altas velocidades fonónicas. Los electrones viajan distancias submicrométricas sin dispersarse sobre la red de grafeno; además, en las muestras obtenidas por exfoliación de grafito no se encuentran defectos cristalinos. El grafeno puede absorber varios átomos y moléculas como NO₂, NH₃, K, OH. Al combinar grafeno puro con F y H se forma fluorgrafeno (también denominado teflón bidi-

mensional)⁶ y grafano⁷ respectivamente. Las propiedades de estos nuevos materiales son, por supuesto, diferentes de las del grafeno puro.

Aun a temperatura ambiente se han podido observar fenómenos como el efecto Hall cuántico fraccional.⁸ Por otra parte, en el único material en el que se ha observado tunelaje de Klein es, ni más ni menos, que en el grafeno,⁹ esto es, al comportarse los electrones en el grafeno como partículas relativistas, podrían atravesar barreras de potencial muy anchas y altas con una probabilidad igual a uno.

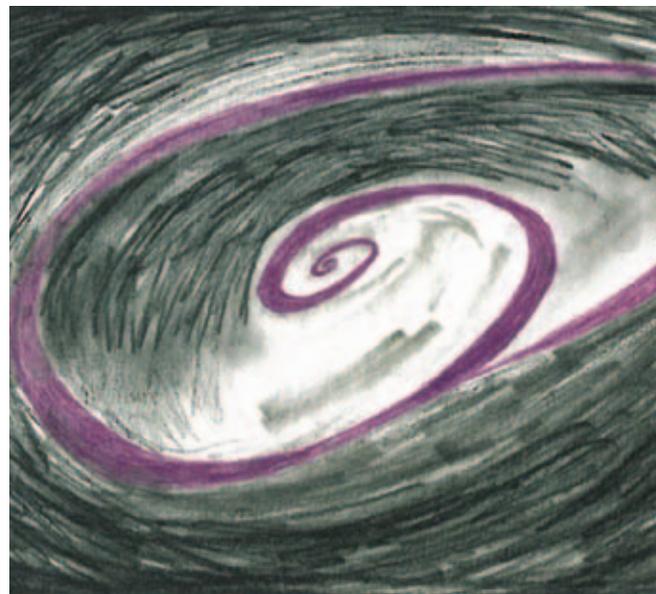
El grafeno sólo absorbe 2.3 % de la luz incidente mientras que el restante 97.7% se transmite,⁴ este comportamiento es aceptable para longitudes de onda desde 550 nm aproximadamente hasta el infrarrojo e incidencia normal. Esta es una característica útil cuando se requiere alta transparencia en la región visible y baja resistividad eléctrica.

Con estas propiedades, el grafeno tiene muchas aplicaciones potenciales, las principales son en el campo de la electrónica, como en los transistores de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés). El grafeno puede extender el intervalo operacional de los transistores de alta movilidad electrónica (HEMT) hasta las frecuencias de terahertz debido fundamentalmente a su alta movilidad eléctrica, más grande que la del GaAs.

El grafeno es el único material donde se ha observado tunelaje de Klein

Ya se han creado dispositivos con base de grafeno como transistores en IBM, con velocidades de 100 GHz¹⁰ y 155 GHz,¹¹ los cuales casi no producen calor. También han creado un mezclador de frecuencias de banda ancha —que es un elemento fundamental para los televisores, celulares y radios—, que opera a 10 GHz entre 300 y 400 K.¹² Podría también usarse el grafeno en baterías,¹³ microprocesadores, antenas,¹⁴ pantallas táctiles, diodos y láseres, paneles solares,¹⁵ fotodetectores,¹⁶ cámaras nocturnas, sensores,¹⁷ capas anticorrosivas,¹⁸ supercapacitores, circuitos integrados de computadora, transformadores de luz y componentes para microscopios electrónicos de transmisión,¹⁹ entre otros. Debido a las propiedades electrónicas, térmicas y a su geometría, el grafeno resulta un material idóneo para aplicarlo en dispositivos termoacústicos.

Finalmente, además de la técnica de exfoliación mecánica, existen otros métodos para producir grafeno. Se puede obtener a partir de hidrocarburos o casi de cualquier compuesto, líquido, sólido o gaseoso, que contenga carbono. Usando metales como Cu, Ni, Co, Ru, que actúan como catalizadores; esta técnica de síntesis se llama descomposición térmica de vapores o



Jacqueline García, C⁶, poema gráfico, 2012.

CVD (por sus siglas en inglés). Con la técnica de CVD se ha logrado fabricar grafeno con dimensiones laterales de 30 pulgadas.²⁰ Otra técnica muy usada, junto con las dos anteriores, es la de crecimiento epitaxial, que consiste en la descomposición térmica del carburo de silicio (SiC). Además de estos métodos de síntesis de mono y multicapas de grafeno, existen otros menos usados, una descripción sencilla de algunos de estos métodos de síntesis se puede encontrar en el artículo de C.N.N. Rao *et al.*²¹

Algunos experimentos realizados en nuestro laboratorio

Producción

Usamos cinta adhesiva para “despegar” el grafeno del grafito en bulto, tal como lo hizo Novoselov. En nuestro laboratorio hemos logrado obtener grafeno con esta técnica; en la figura 3 se muestra el procedimiento de la exfoliación y una imagen de grafeno obtenida con el microscopio óptico.

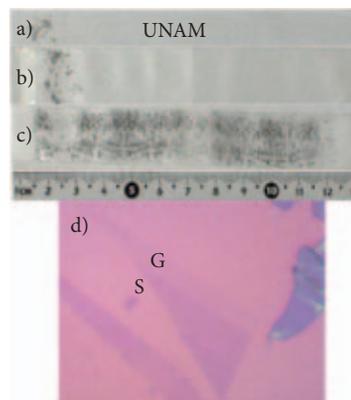


Figura 3. a) Hojuelas de grafito antes de la exfoliación mecánica, b) la cinta adhesiva se ha pegado y despegado sobre sí misma una sola vez, c) la cinta se ha pegado y despegado sobre sí las veces necesarias para cubrir el largo de la cinta de las hojuelas exfoliadas, d) las capas de grafeno sobre el sustrato vistas al microscopio óptico, G corresponde al grafeno, S al sustrato.



Jacqueline García,
C⁶, poema gráfico,
2012.

También obtenemos multicapas de grafeno con la técnica de CVD con hexano líquido y metano como precursores del carbono y lámina de cobre como catalizador. En el proceso de síntesis se usa el hidrocarburo diluido con hidrógeno a una temperatura de 1000 °C y a presión atmosférica, todos los detalles del proceso se pueden encontrar en la referencia 22.

El grafeno se despega del grafito con cinta adhesiva

Cuando el sistema se enfría, el carbono queda en forma de multicapas sobre la superficie del cobre y toma la morfología de éste. Las multicapas obtenidas sobre el cobre pueden transferirse a diferentes sustratos para su caracterización. Con las condiciones y los materiales mencionados se obtuvieron aproximadamente once capas de grafeno con el empleo de hexano líquido y cinco capas con el metano.

Caracterización

Una de las técnicas ópticas que ha demostrado ser útil para calcular el número de capas de grafeno soportadas en el sustrato SiO₂/Si es la del contraste óptico por reflexión,²³ en la que el contraste óptico se define como:

$$C = 1 - \frac{I_G}{I_S}$$

Donde I_G e I_S son las intensidades de la luz reflejada por las capas de grafeno sobre el sustrato y la reflejada sólo por el sustrato, respectivamente. Debido al tamaño de las muestras obtenidas por exfoliación mecánica de grafito, no podemos usar ningún dispositivo que nos permita medir directamente las intensidades de la luz que intervienen en la ecuación, por lo que es necesario emplear un microscopio óptico. Los colores que observamos en la actualidad en los dispositivos digitales son asignados a cada pixel de la imagen mediante el sistema de color RGB, que es una combinación de los colores rojo (*red*), verde (*green*) y azul (*blue*). La luz del microscopio incide normalmente sobre el sustrato, la luz que refleja este sistema aire-muestra-sustrato permite ver imágenes como las de la figura 3d; entonces las fotografías obtenidas son el resultado de la luz que reflejan las muestras. Con base en esta idea, y en que el mayor contraste de este sistema se observa en luz verde,²³ tomamos la componente G de la imagen digital del sustrato y de las capas de grafeno, usamos la ecuación anterior y al comparar con el contraste teórico conocemos el número de capas de grafeno; el cálculo completo del contraste teórico aparece en la referencia 22 y los resultados se muestran en la figura 4. Desde luego estos resultados no son suficientes para decir que la técnica de los números RGB es válida. Para corroborar los resultados de la figura 4 se emplea espectroscopia Raman, que también es muy útil para diferenciar el número de capas de grafeno. Encontramos que los espectros Raman concuerdan con el número de capas predicho por la técnica usada, al menos hasta cuatro capas.

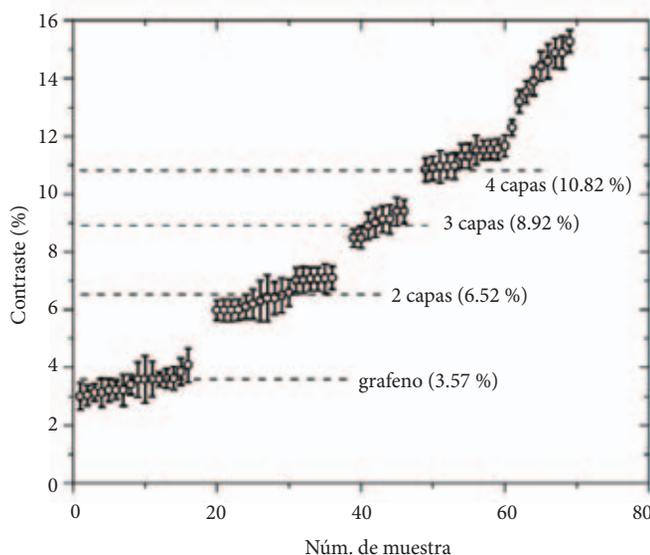


Figura 4. Contraste óptico; las líneas punteadas horizontales corresponden al contraste teórico. A partir de cuatro capas es difícil decir cuántas capas tenemos usando la técnica de los números RGB.

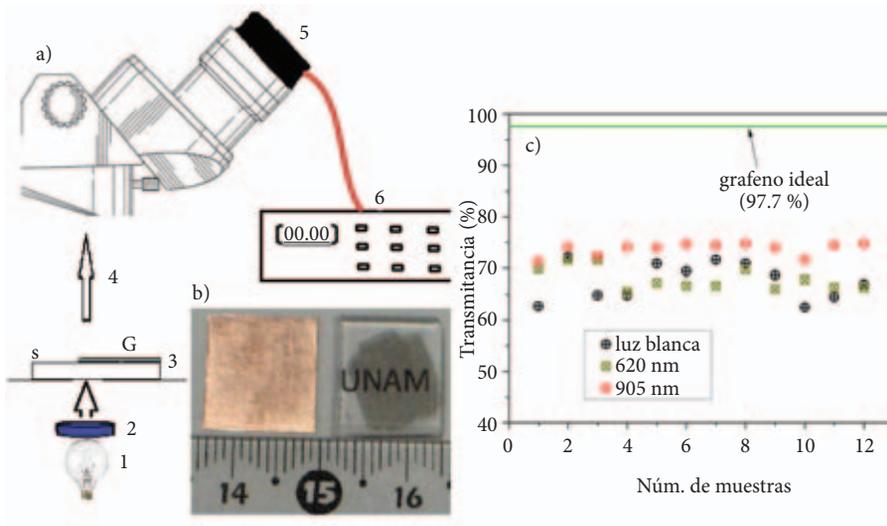


Figura 5. a) Arreglo para transmisión y muestras obtenidas por CVD, 1: fuente de luz, 2: filtro, 3: muestra de multicapas de grafeno sobre un sustrato de cuarzo, 4: luz transmitida, 5: fotodiodo, 6: amperímetro; b) se observan las muestras obtenidas por CVD sobre cobre y sobre un sustrato de cuarzo, en este último se observa la transparencia de las multicapas; c) se presentan los resultados de la transmitancia de las multicapas de grafeno usando el dispositivo en a.

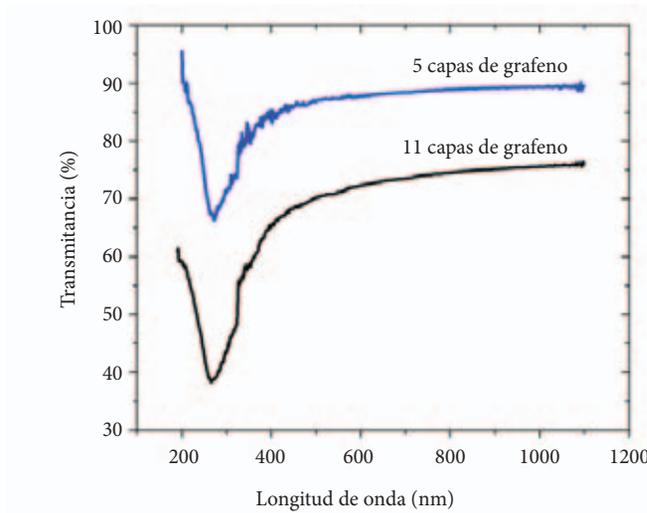
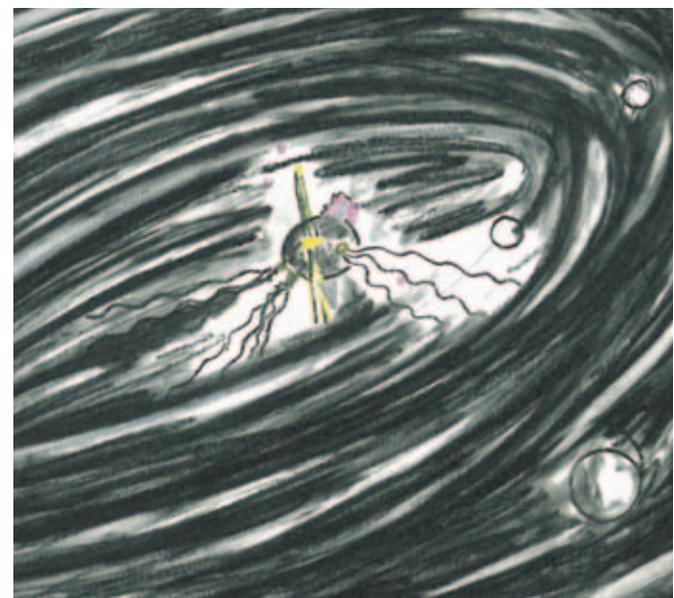


Figura 6. UV-Vis de once y cinco capas de grafeno obtenidas por CVD, usando hexano líquido y metano respectivamente.

Para conocer el número de capas obtenidas por CVD hemos implementado un arreglo experimental para medir la intensidad de la luz transmitida por las muestras. El arreglo experimental y los resultados obtenidos con éste se presentan en la figura 5a y b respectivamente, en la figura 6 presentamos espectros UV-Vis que refuerzan el resultado del número de capas que se obtienen con la propuesta anterior.²⁴

Efecto termoacústico

Trabajamos con multicapas (cinco capas) para estudiar el efecto termoacústico. El experimento consiste en excitar la muestra con una señal sinusoidal con un generador de funciones, por la parte posterior del vidrio se coloca un termopar muy delgado conectado a un sensor de temperatura; tal como se muestra en la figura 7.



Jacqueline García, C⁶, poema gráfico, 2012.

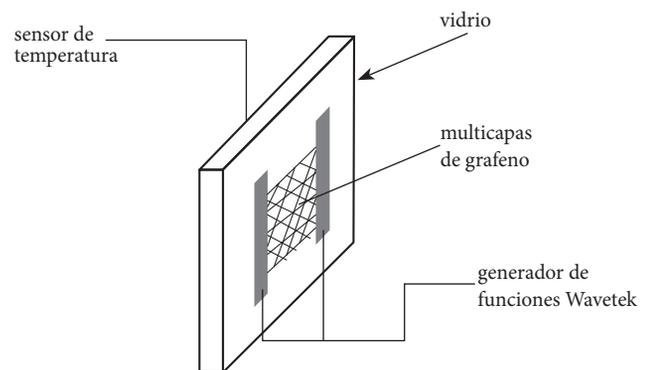


Figura 7. Arreglo experimental para medir las variaciones de temperaturas generadas por las multicapas de grafeno, cuando son excitadas por una corriente alterna.

En la figura 8 se presenta la medición de las variaciones de la temperatura debido al efecto Joule. Se puede apreciar que la frecuencia en la variación de la temperatura es el doble que la frecuencia de excitación, este comportamiento también se observa cuando se mide la frecuencia del sonido que se emite. Es interesante hacer notar que, en condiciones apropiadas de bajo ruido ambiental, es posible detectar a simple oído humano el sonido generado por el dispositivo. Con estos resultados se confirma que el efecto que se observa es termoacústico.

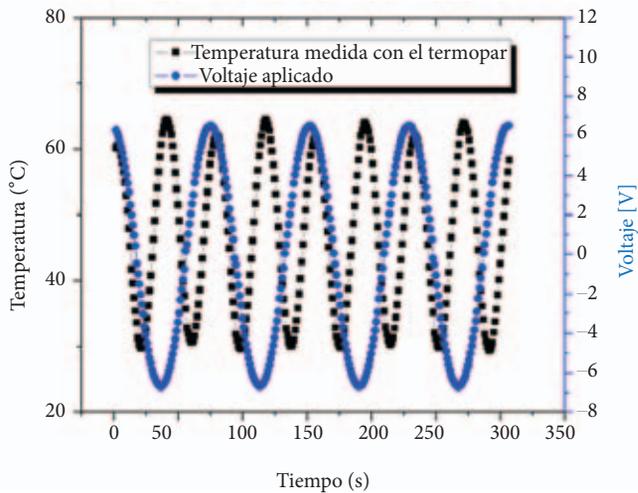
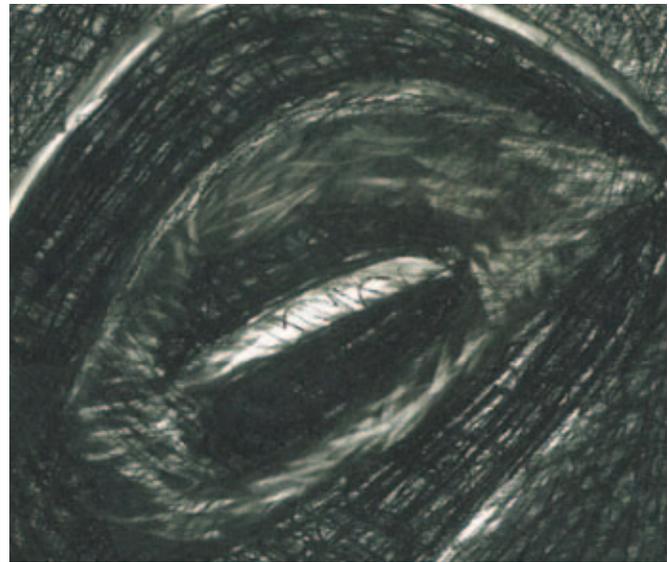


Figura 8. Comparación entre la señal de excitación y la temperatura de la muestra debido al calentamiento por efecto Joule.

Un experimento de efecto túnel

Por el hecho de que en la cercanía de los puntos de Dirac el comportamiento de los portadores de carga en el grafeno puede describirse con la ecuación relativista de Dirac, surge la pregunta sobre la posibilidad de observar experimentalmente el efecto túnel predicho por Klein para partículas relativistas (tu-



Jacqueline García, *C⁶, poema gráfico*, 2012.

nelaje de Klein). Para estudiar la existencia del tunelaje de Klein se construyeron dispositivos del tipo junta túnel, empleando multicapas de grafeno como electrodos y el vacío entre ambos electrodos actuando como la barrera de potencial (figura 9a).²⁵ En la figura 9b aparece la característica de corriente-voltaje para tres temperaturas de un dispositivo de este tipo. Pueden observarse en esta figura dos regímenes en el comportamiento eléctrico; uno lineal a bajos voltajes y otro superlineal a voltajes altos. Existe la predicción teórica que dice que para el tunelaje de Klein la corriente eléctrica tiene una dependencia del voltaje del tipo $\sim V^{3/2}$.²⁶ En la figura 9b se grafica el comportamiento teórico predicho y puede observarse que a altos voltajes los resultados experimentales tienen un comportamiento muy cercano al esperado. Este resultado parece avalar la existencia del tunelaje de Klein en el grafeno.

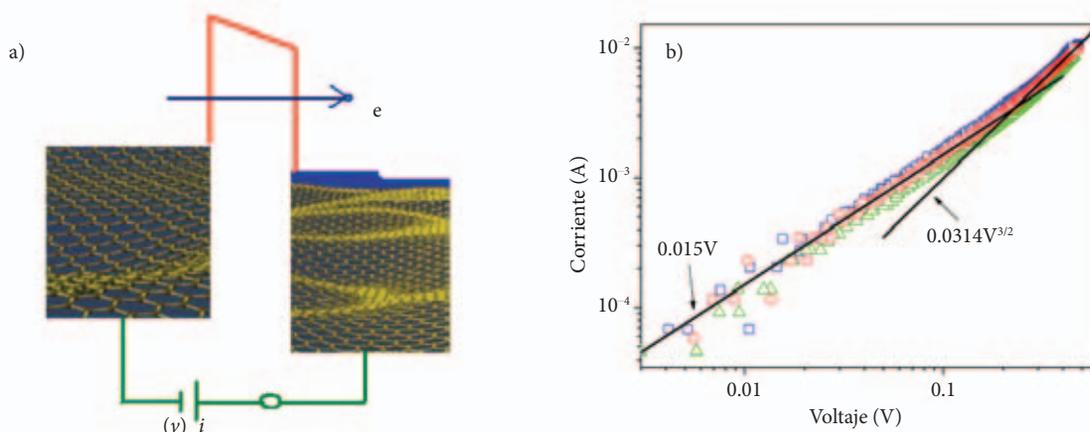


Figura 9: a) configuración esquemática para observar el efecto túnel de electrones a través de una barrera de potencial (línea roja) entre dos capas de grafeno a ambos lados de la barrera; b) característica corriente-voltaje de una junta túnel donde se observa un comportamiento superlineal a altos voltajes con una potencia 3/2, como se predice teóricamente para tunelaje de Klein. Las mediciones se hicieron a diferentes temperaturas: 89K (triángulos), 296K (círculos) y 380K (cuadrados).

Comentarios finales

La estructura hexagonal bidimensional del grafeno es la responsable de sus peculiares propiedades electrónicas, ópticas y fonónicas. Estas propiedades a su vez permiten que el grafeno tenga un gran potencial para aplicaciones, principalmente en el campo de la optoelectrónica. Por eso nos ha interesado obtenerlo, caracterizarlo, modificarlo y realizar diversos experimentos con este material. Hemos obtenido grafeno mediante exfoliación mecánica de grafito y multicapas de grafeno con la técnica de CVD. Actualmente trabajamos en la conversión de grafeno a tipo n y tipo p, al introducir diferentes impurezas para posteriormente fabricar y estudiar las propiedades ópticas y electrónicas de sistemas complejos (metamateriales). Hemos realizado y continuaremos llevando a cabo diversos experimentos para estudiar el efecto termoacústico, de tunelaje de Klein y dispositivos del tipo junta túnel híbridos con grafeno y materiales magnéticos o superconductores.

Es importante mencionar que en el laboratorio hemos encontrado lo que parece ser un nuevo fenómeno en las multicapas de grafeno: modulación de la transmitancia óptica con una señal eléctrica; fenómeno que eventualmente podría ser útil en la transmisión de información por medios ópticos.

Finalmente, es interesante resaltar que es tal la expectativa sobre las propiedades físicas y las posibles aplicaciones del grafeno y sistemas relacionados que, a propuesta de los premios Nobel Geim y Novoselov, se creará en Inglaterra el Instituto del Grafeno, centro de investigación que se espera empiece a operar en 2015.²⁷

Bibliografía

- ¹ A.K. Geim y K.S. Novoselov, “The Rise of Graphene”, *Nature Materials*, **6** (2007), 183-191.
- ² K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva y A.A. Firsov, “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films”, *Science*, **306** (2004), 666.
- ³ K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S. V. Dubonos y A.A. Firsov, “Two-dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene”, *Nature*, **438** (2005), 197.
- ⁴ P.P. Nair, P. Blake, A.N. Grigorenko, K.S. Novoselov, T.J. Booth, T. Stauber, N.M.R. Peres y A. K. Geim, “Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene”, *Science*, **320**, núm. 5881 (2008), 1308.
- ⁵ A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov y A.K. Geim, “The Electronic Properties of Graphene”, *Review of Modern Physics*, **81**, núm. 1 (2009), 109-162.
- ⁶ P.P. Nair, W. Ren, R. Jalil, I. Riaz, V.G. Kravets, L. Britnell, P. Blake, F. Schedin, A.S. Mayorov, S. Yuan, M.I. Katsnelson, H.M. Cheng, W. Strupinski, L.G. Bulusheva, A.V. Okotrub, I.V.

Grigorieva, A.N. Grigorenko, K.S. Novoselov y A.K. Geim, “Fluorographene: A Two-Dimensional Counterpart”, *Small*, **6**, núm. 24 (2010), 2877-2884.

⁷ D.C. Elias, R.R. Nair, T.M.G. Mohiuddin, S.V. Morozov, P. Blake, M.P. Halsall, A.C. Ferrari, D.W. Boukhvalov, M.I. Katsnelson, A.K. Geim y K.S. Novoselov, “Control of Graphene’s Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphene”, *Science*, **323** (2009), 610-613.

⁸ Y.W. Tan, H.L. Stormer y P. Kim, “Experimental Observation of the Quantum Hall effect and Berry’s Phase in Graphene”, *Nature*, **438** (2005), 201-204.

⁹ N. Stander, B. Huard y D.G. Gordon, “Evidence for Klein Tunneling in Graphene p-n Junctions”, *Physical Review Letters*, **102** (2009), 026807(1-4).

¹⁰ Y.M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K.A. Jenkins, D.B. Farmer, H.Y. Chiu, A. Grill y P. Avouris, “100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene”, *Science*, **327** (2010), 662.

¹¹ Y. Wu, Y.M. Lin, A.A. Bol, K.A. Jenkins, F. Xia, D.B. Farmer, Y. Zhu y P. Avouris, “High-Frequency, Scaled Graphene Transistors on Diamond-Like Carbon”, *Nature*, **472** (2022), 74-78.

¹² Y.M. Lin, A.V. García, S.J. Han, D.B. Farmer, I. Meric, Y. Sun, Y. Wu, C. Dimitrakopoulos, A. Grill, P. Avouris y K.A. Jenkins, “Wafer-Scale Graphene Integrated Circuit”, *Science*, **332** (2011), 1294-1297.

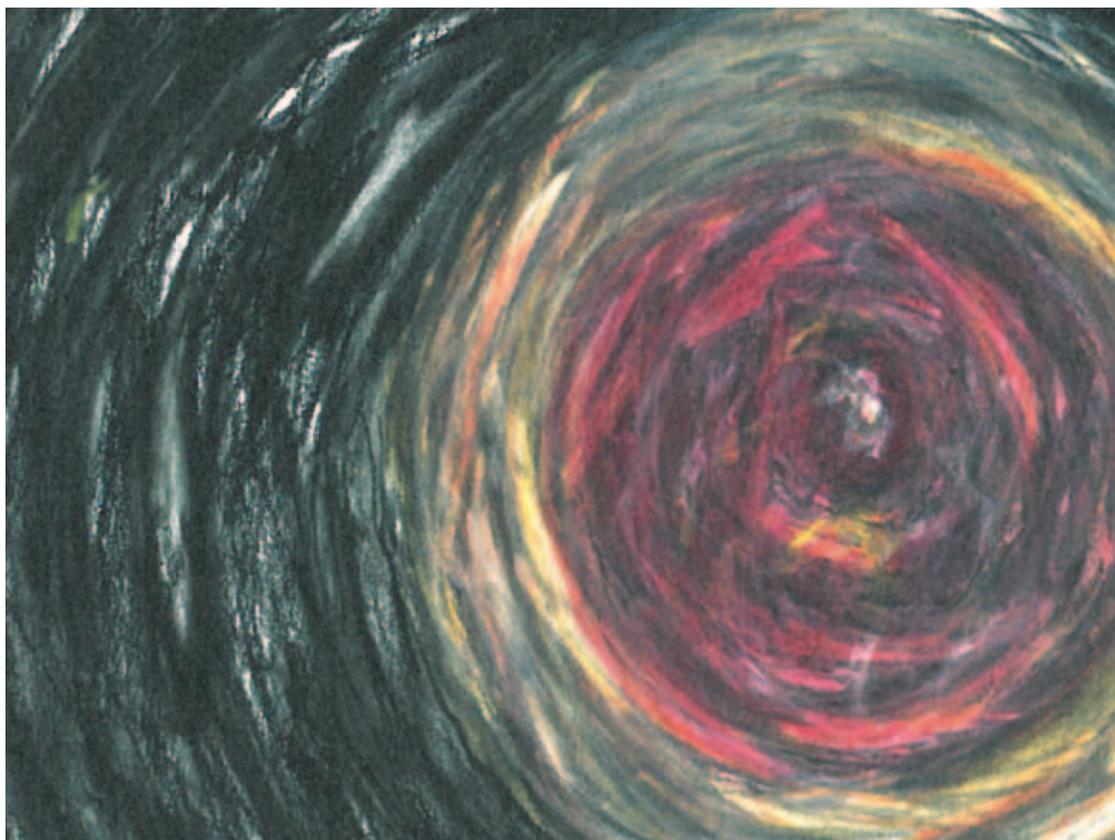
¹³ Z. Chen, M. Zhou, Y. Cao, X. Ai, H. Yang y J. Liu, “In Situ Generation of Few-Layer Graphene Coatings on SnO 2-SiC Core-Shell Nanoparticles for High-Performance Lithium-Ion Storage”, *Adv. Energy Mater.*, **XX** (2011), 1-10.



Jacqueline García, C⁶, poema gráfico, 2012.

- ¹⁴ W. Zhou, J. Lee, J. Nanda, S.T. Pantelides, S.J. Pennycook y J.C. Idrobo, "Atomically Localized Plasmon Enhancement in Monolayer Graphene", *Nature Nanotech.*, **7** (2012), 161-165.
- ¹⁵ C. Xie, P. Lv, B. Nie, J. Jie, X. Zhang, Z. Wang, P. Jiang, Z. Hu, L. Luo, Z. Zhu, L. Wang y C. Wu, "Monolayer Graphene Film/Silicon Nanowire Array Schottky Junction Solar Cells", *Appl. Phys. Lett.*, **99** (2011), 133113(1-3).
- ¹⁶ T. Echtermeyer, L. Britnell, P. Jasnós, A. Lombardo, R. Gorbachev, A. Grigorenko, A. Geim, A. Ferrari y K. Novoselov, "Strong Plasmonic Enhancement of Photovoltage in Graphene", *Nature Communications*, **2**, núm. 8 (2011), 458(1-5).
- ¹⁷ S. Lara-Ávila, K. Moth-Poulsen, R. Yakimova, T. Bjørnholm, V. Fal'ko, A. Tzalenchuk y S. Kubatkin, "Non-Volatile Photochemical Gating of an Epitaxial Graphene/Polymer Heterostructure", *Adv. Mat.*, **23** (2011), 878-882.
- ¹⁸ D. Prasai, J.C. Tuberquia, R.R. Harl, G.K. Jennings y K.I. Bolotin, "Graphene: Corrosion-Inhibiting", *ACS Nano*, **6**, núm. 2, 1102-1108.
- ¹⁹ A.K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", *Science*, **324** (2009), 1530-1534.
- ²⁰ S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J.S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H.R. Kim, Y.I. Son, Y.J. Kim, K.S. Kim, B. Özyilmaz, J.H. Ahn, B.H. Hong y S. Iijima, "Roll-to-Roll Production of 30-Inch Graphene Films for Transparent Electrodes", *Nature Nanotechnology*, **5** (2010), 574-578.
- ²¹ C.N.N. Rao, K.S. Subrahmanyam, H.S.S. Ramakrishna Matte, B. Abdulhakeem, A. Govindaraj, B. Das, P. Kumar, A. Gosh y D.J. Late, "A Study of the Synthetic Methods and Properties of Graphenes", *Science and Thechnology of Advanced Materials*, **11**, núm. 5 (2010), 054502 (1-15).
- ²² C. Bautista Flores, "Producción de monocapas y multicapas de grafeno, determinación del número de capas por técnicas ópticas", tesis de maestría, México, UNAM, 2011.
- ²³ P. Blake, E.W. Hill, A.H. Castro Neto, K.S. Novoselov, D. Jiang, R. Yang, T.J. Booth y A.K. Geim, "Making Graphene Visible", *Applied Physics Letters*, **91** (2007), 063124(1-3).
- ²⁴ C. Bautista y D. Mendoza, "Multilayer Graphene Synthesized by CVD Using Liquid Hexane as the Carbon Precursor", *World Journal of Condensed Matter Physics*, **1** (2011), 157-160.
- ²⁵ D. Mendoza, "Electrical Conductivity of Collapsed Multilayer Graphene Tubes", *World Journal of Nano Science and Engineering*, **2** (2012), 53-57.
- ²⁶ N. Vandecastle, A. Barreiro, M. Lazzeri, A. Bachtold y F. Mauri, "Current-Voltage Characteristics of Graphene Devices: Interplay Between Zenner-Klein Tunneling and Defects", *Phys. Rev. B*, **82**, núm. 4 (2010), 045416(1-10).
- ²⁷ G. Brumfiel, "Britain's Big Bet on Graphene", *Nature*, **488** (2012), 140-141.

*claudiabautistaf@gmail.com



Jacqueline García,
C⁶, poema gráfico,
2012.

Procesamiento de aleaciones semiconductoras Ga(In)N

M. López-López* y **M. Ramírez-López**, Departamento de Física, Cinvestav-IPN; **G. Contreras-Puente**, Escuela Superior de Física y Matemáticas-IPN; **G. Santana-Rodríguez**, IIM-UNAM; **R. Mendoza-Pérez**, Universidad Autónoma de la Ciudad de México; **J. Aguilar-Hernández** y **F. de Moure-Flores**, Escuela Superior de Física y Matemáticas-IPN; **L. Zamora-Peredo**, Centro de Investigaciones en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana; **V.H. Méndez-García**, Centro para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí; **O. de Melo**, Facultad de Física, Universidad de La Habana, y **J. Huerta-Ruelas**, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro.

Resumen

Desde hace poco los materiales basados en compuestos III-N —con el elemento del grupo III: aluminio (Al), galio (Ga) o indio (In)— han tenido un auge impresionante por sus propiedades ópticas y eléctricas únicas. Estas aleaciones son bastante estables y poseen un amplio rango de ancho de banda de energía prohibida, que abarca longitudes de onda que van desde el ultravioleta profundo hasta el infrarrojo, por tal motivo son susceptibles de utilizarse en una gran variedad de aplicaciones microelectrónicas y optoelectrónicas. Algunas de estas aplicaciones son transistores de alta movilidad electrónica (HEMT), diodos emisores de luz visible (LED) y diodos láser (LD). En particular las aleaciones de Ga(In)N tienen un gran potencial para aplicaciones en celdas solares de alta eficiencia. En este artículo presentamos resultados recientes de nuestro grupo de investigación concernientes al procesamiento y caracterización de estos materiales.

Introducción

En la comunidad de científicos y tecnólogos, en el área de los dispositivos fotovoltaicos, existe un gran interés por incremen-

tar la eficiencia de las celdas solares para aplicaciones terrestres. Estas aplicaciones no sólo prometen opciones energéticas en lugares en donde la accesibilidad es muy limitada, sino que además ofrecen una alternativa de energía limpia, renovable y factible a corto plazo. El desarrollo sostenido de las celdas solares exige tecnologías de fabricación sencillas y económicas. Esto representa un gran reto, pues se desean capas delgadas de materiales de entre 1 y 1.5 μm de espesor a las que se les pueda regular el ancho de banda prohibida, entre 0.8 y 2.7 eV, y que a la vez posean un coeficiente de absorción suficientemente alto ($>10^4 \text{ cm}^{-1}$) para favorecer la absorción de luz en la mayor parte del espectro solar. Además se requiere que sus propiedades de transporte sean excelentes, con una elevada movilidad y tiempos de vida de sus portadores que garanticen longitudes de difusión de los portadores minoritarios de más de 2 μm y que no sufran degradación de su fotoconductividad después de prolongadas exposiciones solares.

Estas características pueden alcanzarse si se emplean, como materiales absorbentes, sistemas de materiales semiconductores (como los III-V) en aleaciones binarias, ternarias e incluso cuaternarias fabricados mediante tecnologías de crecimiento



María Ruiz, *Mi árbol*, 2011.

de películas muy delgadas. Las celdas solares con una sola capa o película delgada absorbente de banda prohibida E_g pueden en teoría alcanzar valores de hasta 30 % de eficiencia en la conversión de energía solar en energía eléctrica. Las mejores eficiencias alcanzadas utilizando GaAs, el cual tiene una banda prohibida de 1.42 eV, son de alrededor de 26 % a una radiación de 100 mW/cm² (un sol) y bajo concentración solar de 29 %. Para mejorar estas eficiencias los investigadores y fabricantes de celdas solares colocan materiales absorbentes apilados con diferentes bandas prohibidas, los cuales permiten por una parte la absorción selectiva de determinadas regiones del espectro solar y, por otra, garantizan el buen acoplamiento electro-óptico de las distintas celdas. Este diseño de multicapas se conoce como celdas solares tipo “tándem”. Las celdas solares de dos uniones que combinan los materiales GaAs y GaInP han alcanzado eficiencias de 32 %.¹ En este tipo de celdas es necesario que los materiales que las constituyen tengan parámetros de red muy próximos, para evitar esfuerzos mecánicos en la interfaz, lo cual ayuda también a disminuir el número de estados electrónicos originados por defectos estructurales que dañan el dispositivo. La eficiencia máxima reportada para celdas de multiunión de tres materiales (InGaP/GaAs/InGaAs) es de 42 % para 406 soles de concentración.² Mientras que las eficiencias alcanzadas para celdas solares de triple unión se restringen a alrededor de 40 %, los resultados de modelación demuestran que se requieren celdas solares tipo “tándem” de por lo menos cinco uniones para alcanzar eficiencias mayores a 50 % con una insolación de AM 1.5 y concentración solar de 500 soles; el material para la celda superior debe tener un ancho de banda prohibida óptimo de 2.4 eV.³

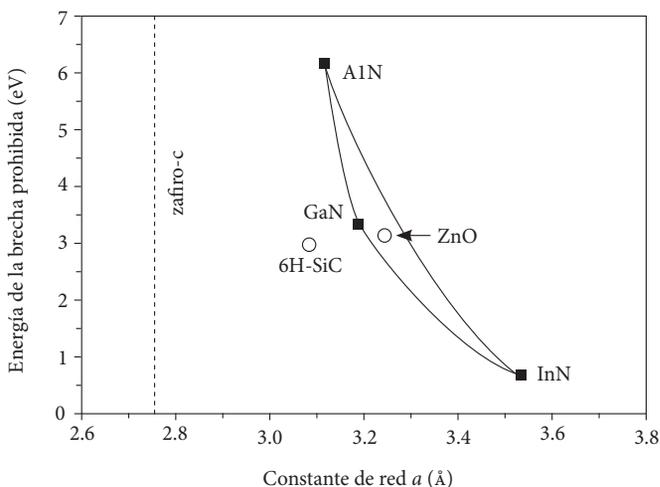


Figura 1. Energía de la brecha prohibida y la constante de la red cristalina de algunos semiconductores compuestos. Las líneas continuas indican las posibles aleaciones y parámetros obtenidos entre los materiales binarios indicados en los extremos de cada línea.

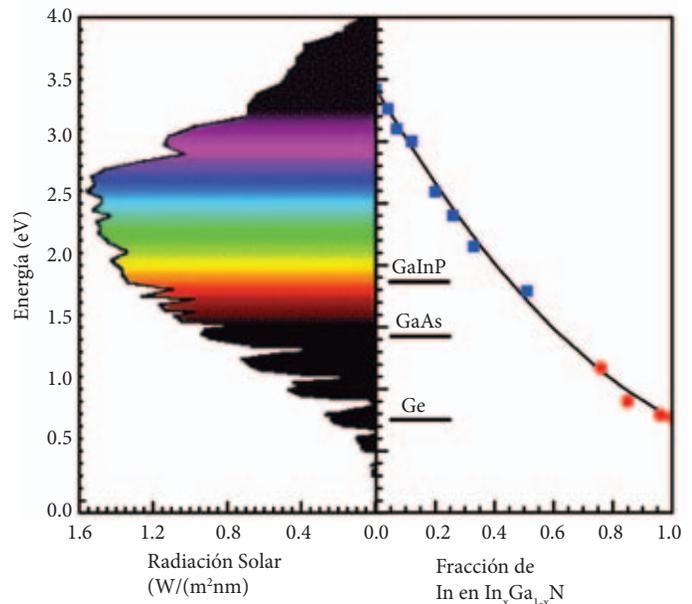
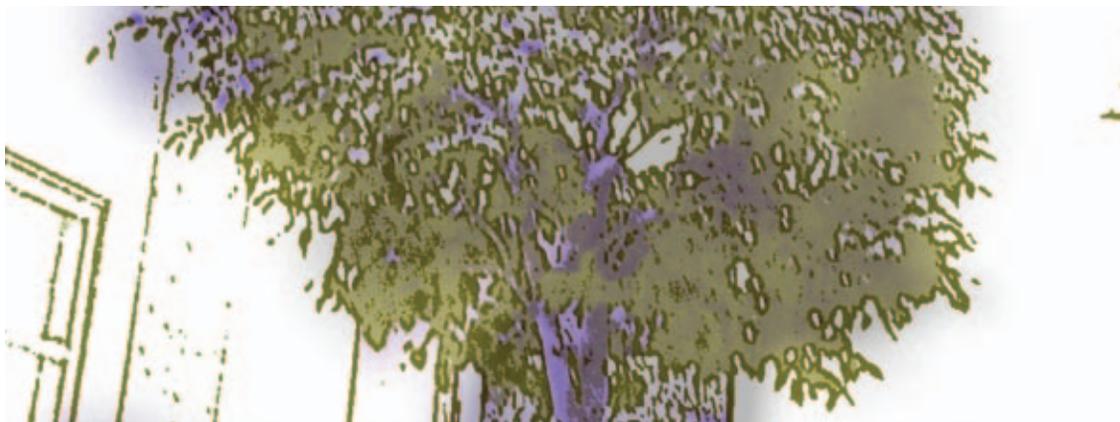


Figura 2. Energía del espectro de radiación solar. El lado derecho de la gráfica muestra la energía de la transición directa de GaInN, en función de la cantidad molar de indio. Se demuestra que es posible cubrir todo el espectro solar mediante aleaciones GaInN.

Aleaciones Ga(In)N

El material Ga(In)N es una aleación semiconductor ternaria con estructura cristalina hexagonal. Su estructura de bandas de energía es de transición directa y su ancho de banda prohibida se puede variar desde 0.64 hasta 3.42 eV dependiendo de la cantidad de In y Ga presentes en la aleación. Añadiendo Al, para producir aleaciones cuaternarias GaAlInN, el rango de variación de la banda prohibida aumenta de 0.64 a 6.2 eV, esto es, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta profundo, como se ilustra en la figura 1. Estos materiales tienen una alta capacidad térmica y su sensibilidad a la radiación ionizante es baja. El desarrollo de capacidades tecnológicas para crecer multicapas de Ga(In)N con diferentes anchos de banda permitirá abarcar prácticamente todo el espectro solar, como se muestra en la figura 2. Las anteriores propiedades hacen de este sistema semiconductor un excelente candidato para su aplicación en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos.

En la actualidad se realizan esfuerzos en diversos laboratorios para producir celdas solares de materiales Ga(In)N. Por ejemplo, hace poco se reportó una celda solar de Ga(In)N procesada por la técnica de depósito por vapores químicos de gases metalorgánicos o MOCVD (por sus siglas en inglés *metal-organic chemical vapours deposit*), que alcanza una eficiencia cuántica externa (que es el porcentaje de pares electrón-hueco creados del número total de fotones) de 55 %.⁴ En esta celda se empleó sólo una capa de Ga(In)N con una concentración muy



María Ruiz, *Mi árbol*, 2011.

baja de indio (~1%). Para alcanzar eficiencias mayores a 60 % se requiere diseñar dispositivos mucho más elaborados con varias capas de Ga(In)N con diferentes concentraciones de In que permitan capturar fotones de un rango más amplio de energías. Sin embargo, para lograr esta tecnología hay una serie de problemas que se deben resolver, entre los que podemos mencionar: *a)* la carencia de un sustrato de soporte óptimo para las películas de GaN y GaInN con una constante de red apropiada para evitar esfuerzos mecánicos que pueden deteriorar las características ópticas y eléctricas de la película, *b)* la alta opacidad de las multiuniones, que puede dar origen a una pobre transmisión óptica entre capas, *c)* la baja conductividad térmica de estos materiales, que puede afectar el desempeño de los dispositivos, *d)* la dificultad para encontrar los materiales adecuados para impurificar, tipos p y n, con la densidad de portadores apropiada, en todo el rango de concentraciones de indio, *e)* la necesidad de desarrollar los contactos eléctricos y recubrimientos antirreflejantes apropiados y *f)* la tendencia a la separación de fases de los materiales constituyentes. En particular, este último problema es muy grave en aleaciones Ga(In)N con alto contenido de indio, pues este elemento se segrega fácilmente hacia la superficie.

Nuestro trabajo

En este artículo presentamos resultados recientes de nuestro grupo de investigación en la síntesis y caracterización de materiales Ga(In)N cristalinos y policristalinos mediante tres técnicas diferentes: epitaxia de haces moleculares (o MBE por sus siglas en inglés: *molecular beam epitaxy*), ablación láser (AL), y transporte de vapor en espaciado cercano (o CSVT por sus siglas en inglés: *close spaced vapor transport*).

Crecimiento por MBE

Es una técnica que proporciona un control muy preciso de los flujos de átomos (o moléculas) que arriban al sustrato provenientes de celdas de efusión, por eso existe la capacidad de depositar de una manera muy controlada monocapas atómicas

de material (e incluso menos). El crecimiento se realiza en ultra alto vacío (~ 10^{-10} Torr), por lo que las capas depositadas son monocristalinas con muy baja concentración de impurezas residuales. Las anteriores características hacen de MBE una técnica ideal para incorporar átomos de In de una manera muy controlada durante el crecimiento de aleaciones Ga(In)N. Los crecimientos los realizamos con un reactor MBE de configuración vertical de fuentes sólidas instalado en el Departamento de Física del Cinvestav. El sistema se muestra en la figura 3 y cuenta con celdas de efusión de galio, aluminio, indio, arsénico, silicio, magnesio y una fuente de plasma por radiofrecuencia para la producción de nitrógeno atómico.

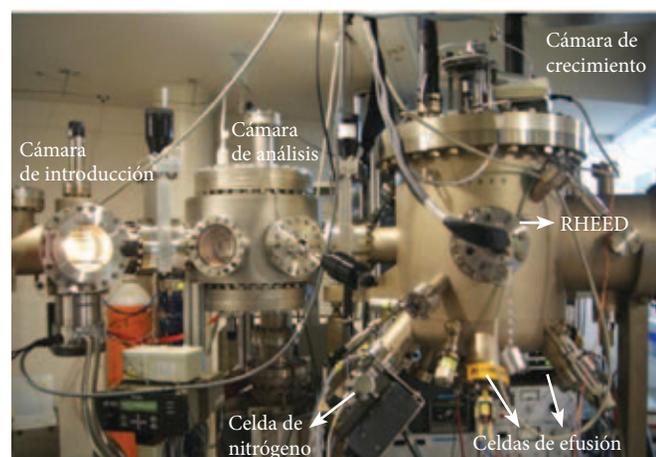


Figura 3. Sistema MBE empleado en los crecimientos de compuestos III-N.

Como primera etapa estudiamos el crecimiento del compuesto binario GaN sobre sustratos de Si(111). Empleamos difracción de electrones de alta energía (o RHEED por sus siglas en inglés *reflection high-energy electron diffraction*) para monitorear in situ el crecimiento. Esta técnica además de proporcionarnos información relativa a la velocidad de depósito nos permite evaluar cualitativamente el estado de la superficie durante el crecimiento.

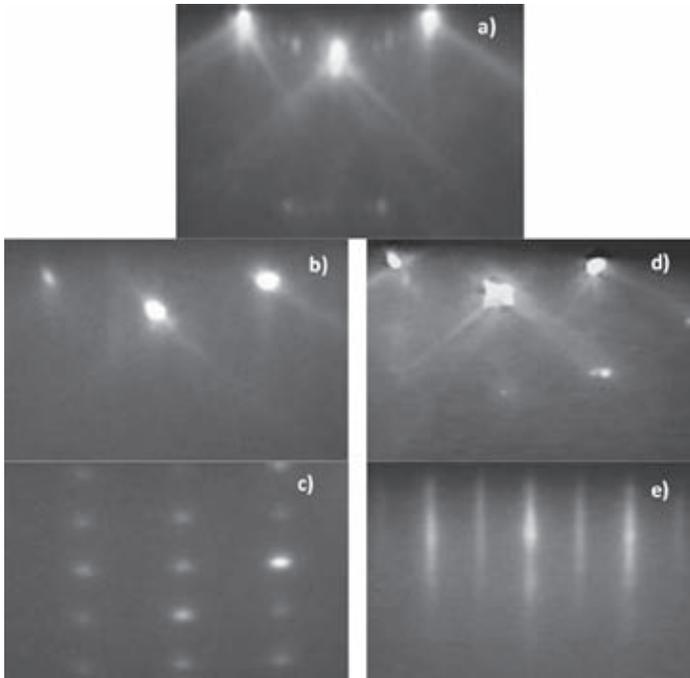
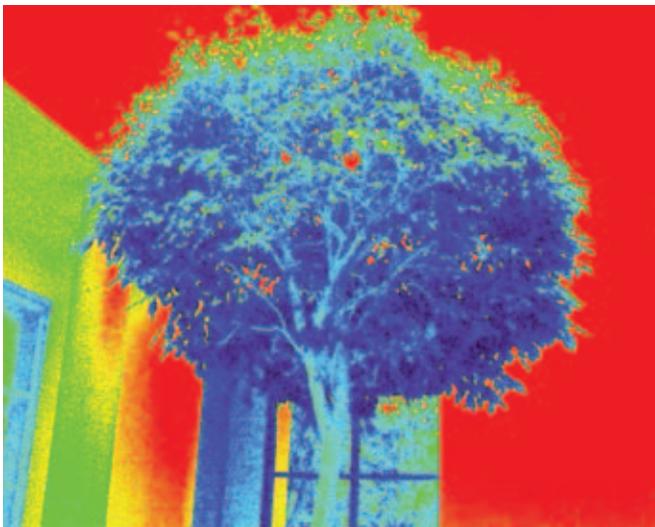


Figura 4. Patrones RHEED en diferentes etapas del crecimiento de GaN, adquiridos después de *a)* desorber los óxidos superficiales del sustrato Si(111), *b)* exponer el sustrato desorbido al flujo de átomos de N, *c)* crecer una película de GaN (después de la etapa *b)*, *d)* depositar 30 nm de Al sobre Si(111) desorbido y *e)* crecer una película de GaN (después de la etapa *d)*.

En la figura 4 mostramos los patrones RHEED en diferentes etapas del crecimiento de GaN sobre Si(111) empleando dos tipos de procesos: crecimiento directo y crecimiento con una capa “colchón” de Al. En La figura 4a se muestra el patrón RHEED del sustrato de Si(111) después de calentarlo a 900 °C y lograr la desorción de los óxidos superficiales. Podemos observar una reconstrucción 7×7 típica de una superficie de



María Ruiz, *Mi árbol*, 2011.

Si(111) atómicamente limpia. En el primer proceso, la superficie limpia de Si se expuso al flujo de átomos de nitrógeno, ante lo cual la reconstrucción superficial se desvaneció (figura 4b) y posteriormente, después de algunos minutos, el patrón RHEED se tornó difuso, lo cual indica la formación de material amorfo. Mediante microscopía electrónica de transmisión corroboramos la formación de una capa amorfa presumiblemente de SiN_x con un espesor de aproximadamente 20 nm (figura 5).

En el laboratorio sintetizamos materiales Ga(In)N con tres técnicas

El patrón RHEED de la película de GaN crecida sobre esta capa amorfa se muestra en la figura 4c, el cual contiene puntos de transmisión correspondientes a una estructura hexagonal; el crecimiento es muy rugoso con una alta densidad de defectos. Para evitar la nitrización de la superficie de Si, en el segundo proceso, sobre la superficie limpia de Si depositamos una capa de aluminio de 30 nm de espesor, cuyo patrón RHEED aparece en la figura 4d. Sobre esta capa de Al realizamos el crecimiento de GaN, que presentó patrones RHEED lineales y además una reconstrucción superficial 2×2, como se observa en la figura 4e, lo cual indica una superficie atómicamente plana.

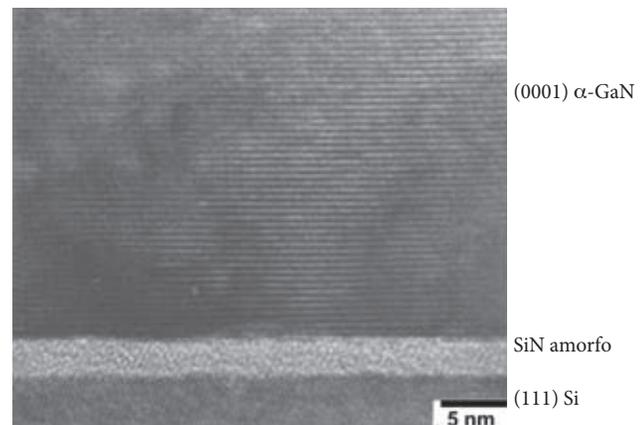


Figura 5. Imagen obtenida por microscopía electrónica de transmisión en sección transversal de una película de GaN crecida por MBE sobre Si(111).

Crecimiento por ablación láser

En esta técnica se emplea un haz de luz láser pulsado de alta intensidad (en promedio de hasta 10 W), de energía del orden de cientos de mJ y con un tiempo de duración de pulso de nanosegundos, enfocado sobre el blanco del material que se desea depositar. El blanco se eleva a temperaturas muy altas, por lo que se produce una eyección tipo pluma de átomos, iones y

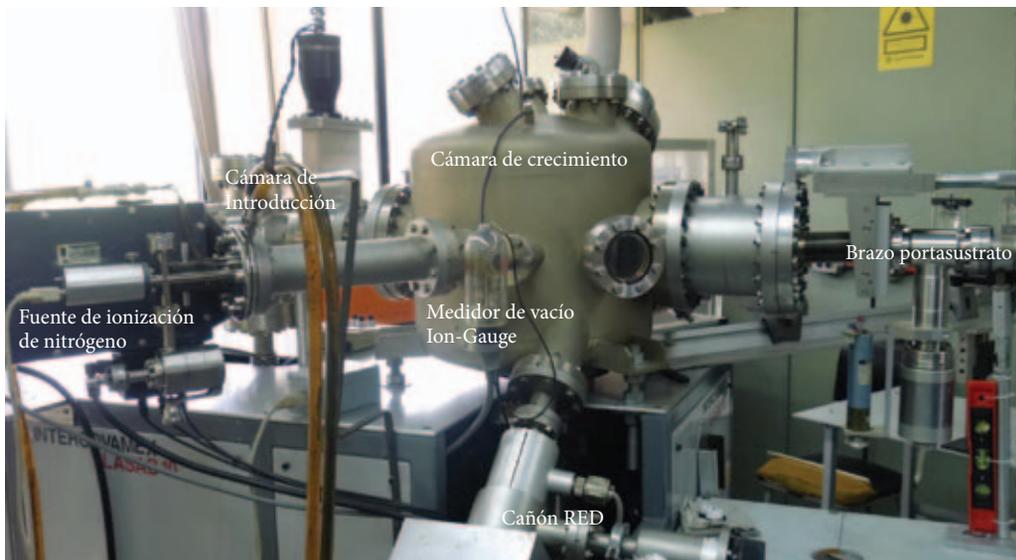


Figura 6. Sistema de AL empleado en los crecimientos de compuestos III-N.

electrones. Estas especies, con una gran energía cinética, recorren una pequeña trayectoria hasta alcanzar el sustrato, en donde se lleva a cabo la correspondiente cinética de crecimiento, del orden de una monocapa o menos, hasta la formación de la película. Tanto el blanco como el sustrato se mantienen en el interior de una cámara de vacío (entre $10^{-5} - 10^{-6}$ Torr), o en atmósfera de algún gas inerte. En nuestro caso empleamos blancos de GaN y Ga(In)N. Se puede elevar la temperatura del sustrato a fin de que los fenómenos de nucleación, formación de las islas y coalescencia sean lo más completos posible y al-

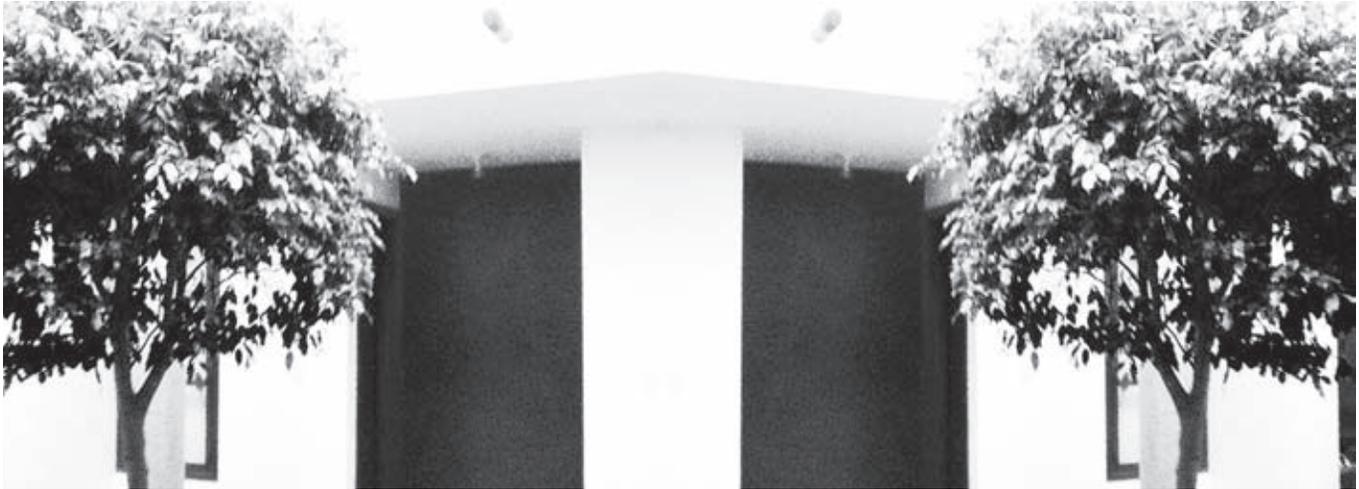
cancemos una buena calidad en las películas así crecidas. Estos crecimientos pueden ocurrir en islas (i), capa por capa (cc) o a través de procesos compuestos (i-cc), la morfología superficial dependerá en gran parte del tipo de sustrato que se utilice. Los parámetros críticos de crecimiento con la técnica AL son: longitud de onda λ de la luz láser a emplear, frecuencia de repetición de los pulsos, duración del pulso, temperatura del sustrato, presión de la cámara de crecimiento; introducción de gas en la cámara, su presión, flujo y si es inerte o activo ionizado; intensidad de la luz láser, y tipo de sustrato. Nuestro trabajo en una primera fase se ha orientado al estudio de la dependencia de las características de las películas en función de estos parámetros de crecimiento, algunos de los cuales tendrán mayor influencia en los crecimientos que otros, como la temperatura del sustrato, la intensidad de la luz láser y el tipo de sustrato.



María Ruiz, *Mi árbol*, 2011.

El crecimiento con láser depende del sustrato y de varios parámetros críticos

Nuestros primeros crecimientos los realizamos con un blanco de GaN en función del tipo de sustrato. Fabricaremos otros blancos utilizando pastillas de GaN sinterizadas para continuar con este estudio. En una segunda etapa evaluaremos cuáles son las mejores películas que se emplearán para la conformación de un dispositivo e investigaremos la impurificación tipos p y n requeridas en los dispositivos fotovoltaicos. El sistema de AL se muestra en la figura 6.



María Ruiz, *Mi árbol*, 2011.

Crecimiento por CSVT

La técnica de transporte de vapor en espaciado cercano es una versión modificada de la técnica de sublimación. En nuestro grupo se ha empleado esta técnica con éxito para procesar compuestos II-VI y III-V. Recientemente en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN se diseñó, construyó y puso en operación un sistema de CSVT dedicado exclusivamente al crecimiento de películas delgadas de GaN (figura 7). El sistema aún requiere que se le instalen otros componentes de vacío y accesorios electromecánicos que lo lleven a un mayor grado de automatización y control. Es importante comentar que, hasta donde sabemos, no existen reportes del crecimiento de aleaciones Ga(In)N con esta técnica, por lo que la investigación para obtener estos materiales mediante CSVT es un componente innovador de este proyecto. Los principales parámetros que debemos optimizar son las temperaturas del

sustrato (T_s) y de la fuente (T_f), también investigaremos la influencia de otros parámetros críticos, como el gas de transporte y la presión y el flujo en la cámara de crecimiento. Los crecimientos de GaN se han llevado a cabo sobre sustratos de silicio, cuarzo y zafiro, variando los parámetros T_s y T_f .

Las películas crecidas con los métodos antes descritos se han caracterizado por diversas técnicas, entre las que se cuentan difracción de rayos X, transmisión óptica, microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión, espectroscopía de energía dispersa y espectroscopía Raman, entre otros.

Como ejemplo presentamos los resultados obtenidos por espectroscopía de fotoluminiscencia, que es una de las técnicas más utilizadas para la determinación de la estequiometría y calidad de las películas. Estas mediciones se realizaron a temperatura ambiente utilizando un laser de He-Cd con emisión a



Figura 7. Sistema CSVT empleado en los crecimientos de GaN.

una longitud de onda de 325 nm y una potencia de 16 mW. En la figura 8 se muestran los espectros de fotoluminiscencia obtenidos para películas de GaN crecidas por MBE, CSVT y AL sobre sustratos de silicio monocristalino con orientación (111). De los espectros es fácil comprobar que la emisión excitónica se encuentra corrida hacia el rojo, lo que podría indicar falta de estequiometría en las películas obtenidas. También se puede observar emisión en la zona verde-amarilla del espectro, que es producida por estados asociados a las vacancias de Ga y a los defectos creados por esfuerzos mecánicos que se originan en las interfaces, y también dentro de las películas que se han depositado. No obstante, la emisión de luminiscencia obtenida, que es observable a temperatura ambiente y a simple vista, muestra que las películas de GaN obtenidas por las tres técnicas son de una buena calidad.

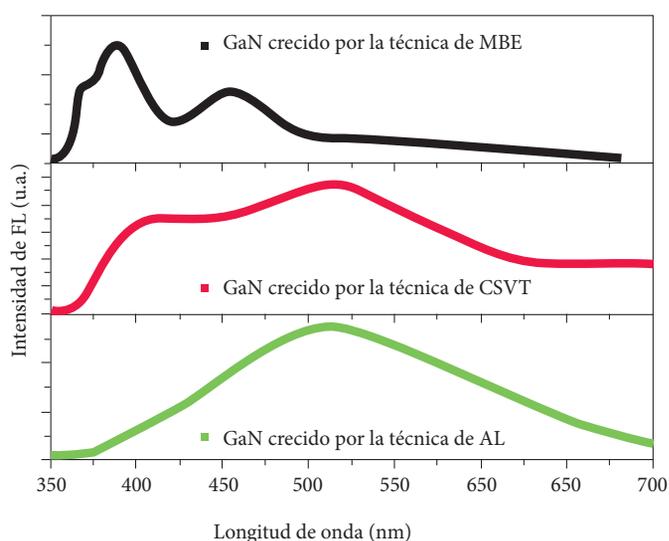


Figura 8. Espectros de fotoluminiscencia para películas de GaN crecidas por MBE, CSVT y AL.

Conclusiones

Hemos presentado los resultados iniciales del crecimiento de películas de GaN con las técnicas de MBE, AL y CSVT. El control de las etapas iniciales del crecimiento de GaN es fundamental para obtener películas con calidad para aplicaciones en dispositivos fotovoltaicos. Mediante MBE logramos evitar la nitrificación de la superficie de Si(111) empleando una capa de aluminio, esto nos permite obtener películas de GaN de buena calidad cristalina que pueden servir de base para el posterior crecimiento de películas de Ga(In)N, lo cual nos daría la posibilidad de fabricar celdas solares de alta eficiencia.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto Conacyt-Secretaría de Energía con número 151076 y el proyecto del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal y la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (ICyTDF-UACM) con número PI2011-52.

Referencias

- 1 I. García, I. Rey-Stolle, B. Galiana, and C. Algora, "A 32.6% Efficient Lattice-Matched Dual-Junction Solar Cell Working at 1000 Suns", *Appl. Phys. Lett.*, **94** (2009), 053509.
- 2 M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa y W. Warta, "Solar Cell Efficiency Tables (Version 37)", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **19** (2011), 84-92.
- 3 A. de Vos, *Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion*, Oxford, Oxford University Press, 1992.
- 4 Y. Kuwahara, T. Fujii, Y. Fujiyama, T. Sugiyama, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki y H. Amano, "Realization of Nitride-Based Solar Cell on Freestanding GaN Substrate", *Appl. Phys. Exp.*, **3** (2010), 111001.

*mlopez@fis.cinvestav.mx



María Ruiz,
Mi árbol, 2011.



Polymat



INTERNATIONAL CONFERENCE ON POLYMERS AND ADVANCED MATERIALS OCTOBER 20-24, 2013



* Functional Polymers

* Functional Organic Materials

* Inorganic and Hybrid Materials

* Organometallic Chemistry and Catalysis

* Bioinorganic and Coordination Chemistry

* Poster Session

Contact:

Prof. Ernesto Rivera Garcia

Institute of Research in Materials, UNAM

Telephone: +52(55)5622-4733

+52(55)5622-4608

Fax: +52(55)5616-1201

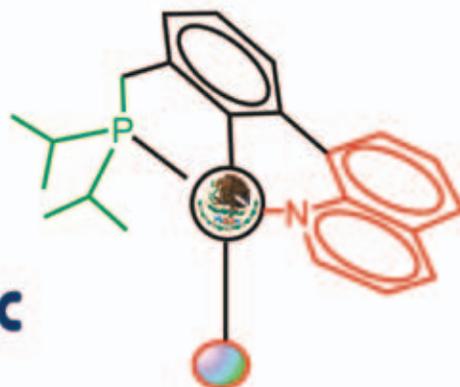
E-mail: polymat@iim.unam.mx


Las Brisas

HUATULCO

SILQCOM 2013

LATINOAMERICAN SYMPOSIUM ON COORDINATION AND ORGANOMETALLIC CHEMISTRY



Hidróxidos dobles laminares: liberadores de moléculas biológicas activas

María de Jesús Martínez Ortiz* y Ariel Guzmán Vargas, Departamento de Ingeniería Química Industrial, ESQIE-IPN.

Introducción

Los hidróxidos dobles laminares, también conocidos como materiales tipo hidrotalcita o arcillas aniónicas, son materiales cristalinos nanoestructurados en forma laminar. Se obtienen de la asociación de cationes metálicos divalentes y trivalentes que ocupan el centro de octaedros cuyos vértices están constituidos por grupos hidroxilos. Los vértices se comparten entre octaedros para formar una estructura laminar de tipo brucita $Mg(OH)_2$. En el caso de los hidróxidos dobles laminares (HDL), en comparación con la brucita, la sustitución de una parte de los cationes divalentes por cationes trivalentes produce cargas positivas en las láminas. Estas cargas positivas se compensan por aniones intercambiables, generalmente solvados con moléculas de agua, alojados en el espacio interlaminar (figura 1). En el caso de los HDL naturales, los aniones CO_3^{2-} se presentan con frecuencia en el espacio interlaminar debido a la adsorción de CO_2 atmosférico. Otros aniones también pueden introducirse en el espacio interlaminar.^{1,2}

Se han realizado muchas investigaciones acerca de este tipo de materiales, los cuales se emplean en general como catalizadores, sensores electroquímicos, adsorbentes, receptores de

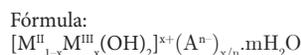
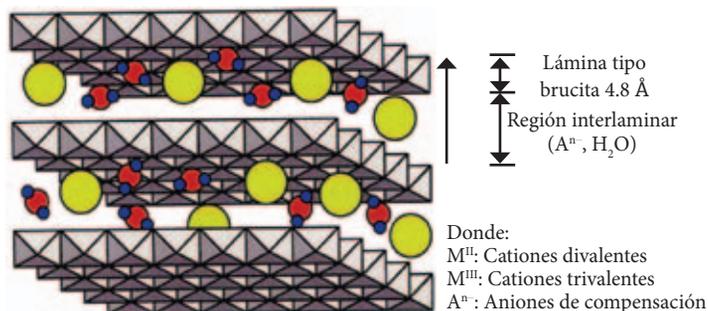


Figura 1. Estructura de un hidróxido doble laminar.

diferentes tipos de especies aniónicas, aditivos para retardantes de flama, cementos y polímeros, producción de nanocompositos y materiales híbridos.³⁻⁵

Los hidróxidos dobles laminares: materiales multifuncionales

Los HDL tienen algunas propiedades intrínsecas interesantes como capacidad de intercambio aniónico, amplia variedad de



Lesly Ivonne Preciado, *Serie Poesía*, 2011, fotografía digital.

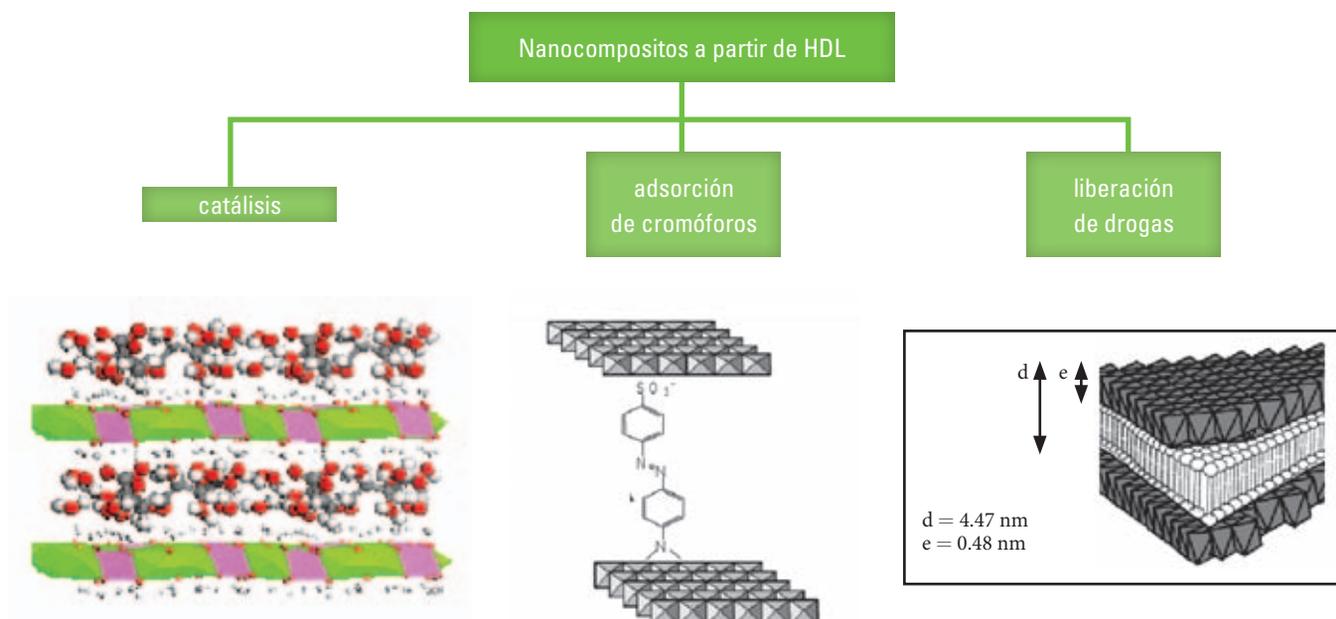


Figura 2. Ejemplos de aplicaciones de los hidróxidos dobles laminares.

composición química, ácido–basicidad modulable, área superficial elevada, efecto memoria y sensibilidad al pH.

Estas propiedades permiten la obtención de una gran variedad de tipos de esta familia de materiales, al modificar su estructura cristalina, su morfología, así como su composición química, con el fin de obtener las características específicas para las aplicaciones deseadas (figura 2).⁶⁻⁸

Materiales con aplicaciones en farmacología

En años recientes ha habido un gran interés por incorporar moléculas biológicamente activas en la estructura de los HDL con objeto de aplicarlos en el área de la medicina mediante la obtención de materiales híbridos.⁹⁻¹² La biocompatibilidad de una molécula activa puede modificarse de acuerdo con la variación en la composición química de los HDL, debido a la sensibilidad de estos materiales a los cambios de pH. Por ejemplo, un HDL que contiene únicamente magnesio y aluminio (Mg/Al) en su estructura, que corresponde al mineral natural llamado hidrotalcita, ha sido muy utilizado debido a su estabilidad frente al pH fisiológico, mientras que un HDL con composición Zn/Al puede tener aplicación a un pH más ácido y, mediante la propiedad de intercambio aniónico, los HDL pueden albergar de manera selectiva y adecuada este tipo de biomoléculas para la obtención de materiales tipo composito; la única restricción es que estas biomoléculas funcionales estén cargadas negativamente para poder alojarse en el espacio interlaminar de los materiales tipo hidrotalcita.¹³ Por otra parte, no existen limitaciones en cuanto al tamaño del anión que se introduce en el espacio

interlaminar, lo que proporciona otra ventaja debido al gran tamaño de las moléculas biológicas activas, así los HDL pueden adaptarse perfectamente para la formación de materiales híbridos–orgánicos en el campo de la farmacología.



Lesly Ivonne Preciado, *Serie Poesía*, 2011, fotografía digital.

Los HDL y la dosificación controlada de drogas

Algunos estudios se han enfocado en el tiempo de dosificación de algunos fármacos, como por ejemplo la furosemida, un diurético empleado en el tratamiento de insuficiencia cardiaca congestiva, hipertensión y edema. El problema de esta molécula es la baja y muy variable biodisponibilidad, que se puede resolver con el mejoramiento de sus propiedades biofarmacéuticas; con este objetivo, se realizaron pruebas para una nueva formulación mediante la intercalación de la furosemida dentro de la matriz inorgánica de un material tipo hidrotalcita Mg/Al y su formulación como tableta para mejorar la liberación en el estómago, donde se absorbe preferentemente esta droga (figura 3). Se realizaron pruebas *in vitro* simulando las condiciones del estómago y se observó una alta y prácticamente completa liberación de la droga, lo que significó que la combinación de la furosemida con un HDL Mg/Al, con un superdesintegrante adecuado como aditivo y lactosa como excipiente, produjo un efecto sinérgico capaz de mejorar la liberación adecuada de la furosemida. Además, los resultados mostraron que el confinamiento de la droga dentro de este HDL Mg/Al ofrece ventajas en términos del aislamiento del medio ambiente, mejorando así su estabilidad y almacenamiento a lo largo del tiempo.¹²

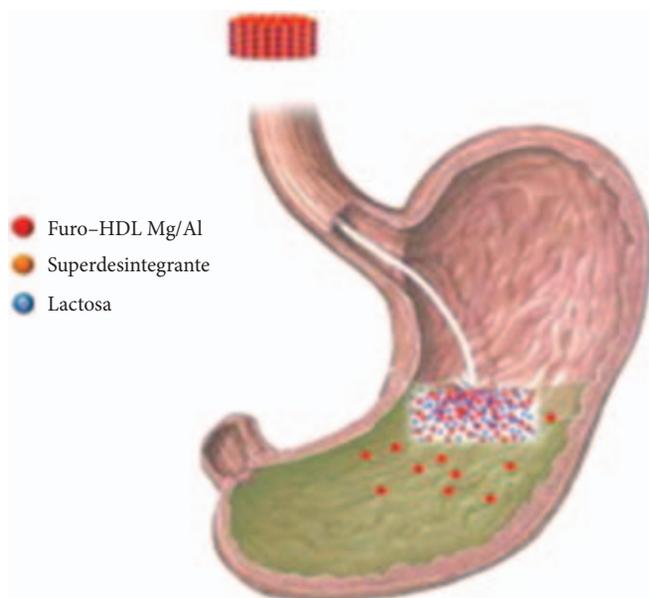


Figura 3. Esquema de simulación de dosificación de la furosemida/HDL Mg/Al.

Los hidróxidos dobles laminares como encapsuladores de drogas inestables

Los HDL que contienen exclusivamente Mg y Al en su estructura se han utilizado como receptores de precursores de fármacos, así como de diversas moléculas bioactivas. Es el caso del encapsulamiento de antioxidantes como la carnosina y el ácido

Lesly Ivonne Preciado, *Serie Poesía*, 2011, fotografía digital.



gálico. Estas moléculas fueron incorporadas dentro de un HDL Mg/Al mediante los métodos de intercambio iónico y coprecipitación (figura 4).

Se observó un comportamiento de liberación *in vitro* de las drogas gradual y bifásico del HDL Mg/Al a un pH de 7.4, estabilizado con una solución buffer fosfatada. Además, no se observaron fenómenos de liberación brusca al comienzo de las pruebas *in vitro*, por lo que los HDL de Mg/Al mostraron su efectividad como matrices para el almacenamiento de drogas antioxidantes inestables.

Los HDL se emplearán para la dosificación de diferentes fármacos

Al mismo tiempo se estudió el efecto de los HDL-antioxidantes en la retención de moléculas productoras de radicales libres, el resultado fue que tanto la liberación controlada de la carnosina y del ácido gálico alojados en HDL Mg/Al funcionaron como excelentes antioxidantes para la retención de radicales con un largo periodo de liberación.¹⁰

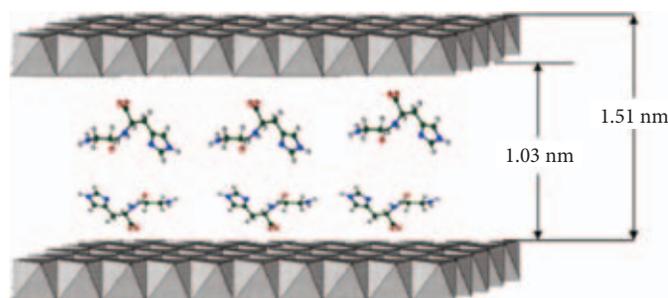


Figura 4. Estructura propuesta para la carnosina-HDL.

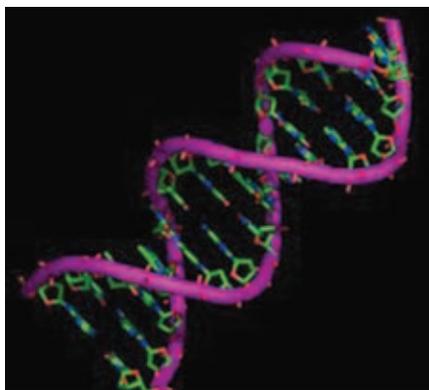


Figura 5. Estructura del ARN.

Los HDL como vehículos de silenciadores de genes

Como es sabido, el ácido ribonucleico (ARN) es un ácido nucleico formado por una cadena de ribonucleótidos. Este compuesto está presente en las células procariotas y eucariotas y es el único material genético de algunos virus. En los organismos celulares desempeña diversas funciones y es la molécula que dirige las etapas intermedias de la síntesis proteica (figura 5). El ADN no puede actuar solo y se vale del ARN para transferir esta información vital durante la síntesis de proteínas. Varios tipos de ARN regulan la expresión genética, mientras otros tienen actividad catalítica.

Por otra parte, los siARN son moléculas de ARN de doble hebra perfectamente complementarias que se originan a partir de un ARN largo de la doble hebra (dsARN). Los siARN suprimen la expresión de algunos genes, lo que los convierte en una herramienta valiosa para la investigación, tanto en cultivos celulares como en organismos vivos, ya que los dsARN o siARN sintéticos o transgénicos pueden introducirse en las células para inducir el silenciamiento selectivo de genes específicos de interés. Esto ha permitido grandes avances en el desarrollo de la biología celular.¹⁴

Los HDL también servirán para silenciar genes selectivamente

Así, recientemente se utilizaron nanopartículas de HDL Mg/Al como vehículos para la liberación controlada de siARN en células mamíferas. Estas nanopartículas fueron capaces de interactuar estrechamente con los siARN y facilitar su absorción dentro de las células mamíferas vía endocitosis, gracias a su tamaño a escala nanométrica, de alrededor de 100 nm, y a su carga superficial positiva, 30 a 40 mV, las cuales permanecieron sin alteraciones en asociación con los siARN. Asimismo y debido a la capacidad que los HDL tienen para actuar como

buffers, los siARN estuvieron protegidos del ambiente ácido del endosoma, lo que ayudó a su liberación controlada y a su escape del mismo. De esta manera se demostró que la liberación se realizó de manera funcional y subsecuentemente provoca un silenciamiento temporal de los genes objetivo. Además, la baja citotoxicidad y disponibilidad de las nanopartículas de HDL en combinación con su capacidad de liberar funcionalmente los siARN, las hace un vehículo prometedor para la eficiente liberación celular de siARN terapéuticos *in vivo* con el propósito de tratar diversas enfermedades.¹⁵

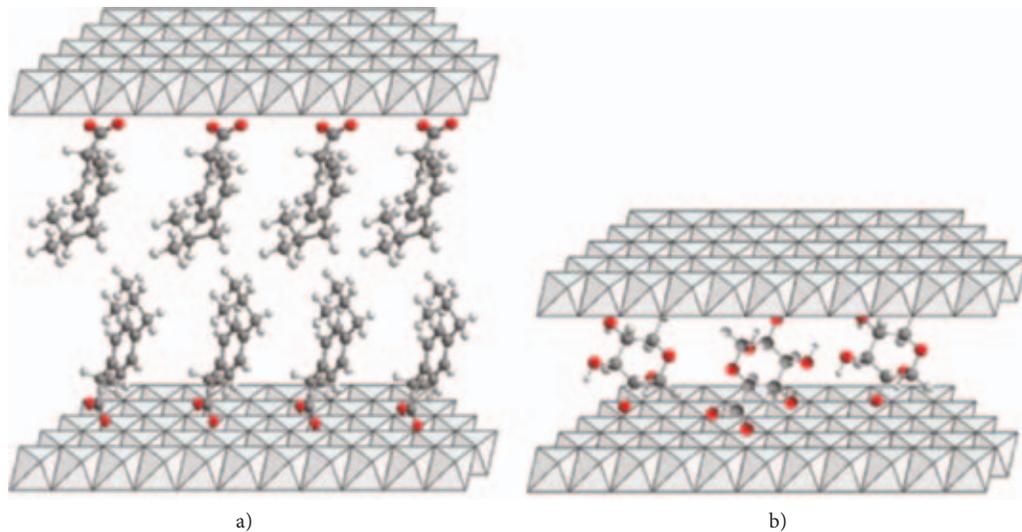
Los HDL como materiales microencapsulados tipo *core-shell*

Actualmente se utiliza una gran variedad de sustancias activas microencapsuladas. Este es el caso de algunos adhesivos, cosméticos, pesticidas, fertilizantes, fragancias y aceites esenciales, vitaminas, enzimas y polímeros, entre otros. Estas sustancias se pueden incorporar a lo que se denomina materiales nanocompositos con una morfología de tipo *core-shell*, donde una sustancia con ciertas propiedades está encapsulada para formar el núcleo o *core*, y está recubierta por otro tipo de material con propiedades distintas y complementarias, lo que se denomina *shell*. Esto se realiza con el fin de lograr materiales multifuncionales.¹⁶⁻²⁰



Lesly Ivonne Preciado, *Serie Poesía*, 2011, fotografía digital.

Figura 6. Arreglos sugeridos para la intercalación de los aniones: a) ibuprofeno y b) glucuronato, en un HDL Mg/Al.



En un trabajo reciente se obtuvieron con éxito nanocompositos magnéticos tipo *core-shell* intercalados con agentes antiartríticos a partir de materiales tipo hidrotalcita. Por ejemplo, la presencia de $MgFe_2O_4$ como parte del núcleo del material le proporcionó las propiedades ferromagnéticas suaves. Estas partículas magnéticas se recubrieron con un HDL Mg/Al-NO₃, vía deposición, con el fin de utilizar su propiedad de intercambio aniónico para finalmente intercalar tanto ibuprofeno como ácido glucurónico, dos agentes antiartríticos.²¹ El proceso de intercambio de los aniones nitrato por el ibuprofeno y el ácido glucurónico condujo a la obtención de HDL magnéticos transportadores de biomoléculas activas. La introducción de los agentes antiartríticos se comprobó mediante el incremento en la distancia interlamina de los materiales, como se observa en la figura 6.

El principal objetivo de sintetizar este tipo de materiales nanocompositos tipo *core-shell* fue la obtención de materiales con propiedades magnéticas biorgánicas con suficiente cantidad de agentes antiartríticos y con mejor estabilidad térmica. Por último, estos materiales presentaron propiedades ferromagnéticas que evidencian su potencial para usarlos en terapias magnéticas contra la artritis (figura 7).

Conclusión

En los últimos años han emergido nuevas aplicaciones para los hidróxidos dobles laminares o materiales tipo hidrotalcita, además de las aplicaciones ya bien conocidas en el campo de la catálisis básica heterogénea. Como se ha podido comprobar, los efectos benéficos que estos materiales pueden producir en la salud humana no tienen restricciones en diferentes tipos de terapias y usos farmacéuticos.

En general, los materiales provenientes de las arcillas o que pertenecen a esta familia de materiales han incrementado su importancia en el área de la medicina y la farmacología gracias a sus propiedades intrínsecas, así como a la inocuidad que presentan, en comparación con otras sustancias que pueden ser dañinas, no sólo para la salud sino también para el medio ambiente.

Así, los HDL también ofrecen a la comunidad científica grandes avances con respecto a nuevas composiciones químicas, al incorporar moléculas bioactivas, nuevas estructuras con diferentes propiedades y un adecuado control de su morfología, entre otros. Todo eso con el fin de lograr la liberación controlada deseada, además de respuestas multifuncionales a las demandas en la confección de nuevos materiales híbridos.

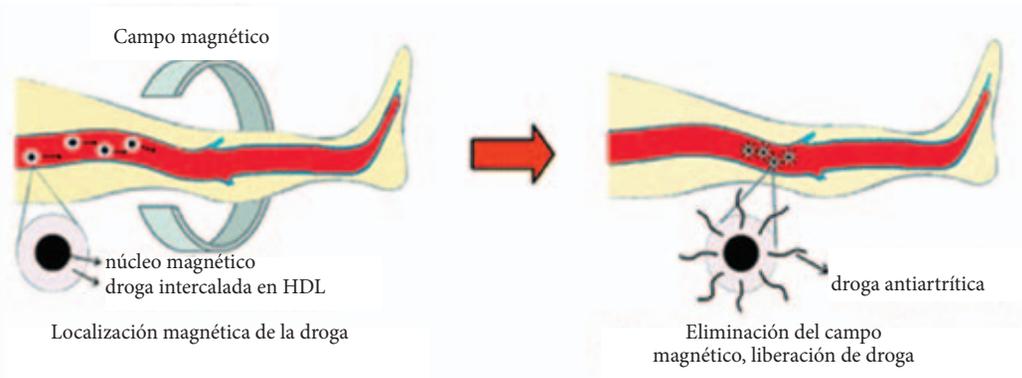


Figura 7. Descripción esquemática de la terapia magnética contra la artritis.

Estos son algunos ejemplos de las nuevas aplicaciones de los HDL, sin embargo la literatura es muy amplia y se puede extender hasta el desarrollo de nuevas terapias con antiinflamatorios, tratamientos para problemas en la piel y terapias contra el cáncer y, de manera general, los efectos benéficos que se pueden lograr sobre la salud pública; un gran reto no sólo para la medicina sino también para los “diseñadores” de nuevos materiales biofuncionales.

Bibliografía

- ¹ S. Miyata, “Physico-Chemical Properties of Synthetic Hydroxaltes in Relation to Composition”, *Clays Clay Miner.*, **28** (1980), 50-56.
- ² F. Cavani, F. Trifirò, A. Vaccari, “Hydroxaltes-Type Anionic Clays: Preparation, Properties and Applications”, *Catal. Today*, **11** (1991), 173-301.
- ³ Q. Wang, D. O’Hare, “Recent Advances in the Synthesis and Application of Layered Double Hydroxide (LDH) Nanosheets”, *Chem. Rev.*, **112** (2012), 4124-4155.
- ⁴ Y. Ono, “Solid base Catalysts for the Synthesis of Fine Chemicals”, *J. Catal.*, **216** (2003), 406-415.
- ⁵ A. Khenifi, Z. Derriche, C. Mousty, V. Prévot, C. Forano, “Adsorption of Glyphosate and Glufosinate by Ni₂Al₂(OH)₆ Layered Double Hydroxide”, *Appl. Clay Sci.*, **47** (2010), 362-371.
- ⁶ E. Lima, M.J. Martínez-Ortiz, R.I. Gutiérrez-Reyes, M. Vera, “Fluorinated Hydroxaltes: The Addition of Highly Electronegative Species in Layered Double Hydroxides to Tune Basicity”, *Inorg. Chem.*, **51** (2012), 7774-7781.
- ⁷ M.J. Martínez-Ortiz, E. Lima, V. Lara, J. Méndez-Vivar, “Structural and Textural Evolution during Folding of Layers of Layered Double Hydroxides”, *Langmuir*, **24** (2008), 8904-8911.
- ⁸ F. Prinetto, M. Manzoli, G. Ghiotti, M.J. Martínez-Ortiz, D. Tichit, B. Coq, “Pd/Mg(Al)O Catalysts Obtained from Hydroxaltes: Investigation of Acid-base Properties and Nature of Pd Phases”, *J. Catal.*, **222** (2004), 238-249.
- ⁹ S. Begu, A. Aubert-Pouëssel, R. Polexe, E. Leitmanova, D.A. Lerner, J.M. Devoisselle, D. Tichit, “New Layered Double Hydroxides/Phospholipid Bilayer Hybrid Material with Strong Potential for Sustained Drug Delivery System”, *Chem. Mater.*, **21** (2009), 2679-2687.
- ¹⁰ X. Kong, L. Jin, M. Wei, X. Duan, “Antioxidant Drugs Intercalated into Layered Double Hydroxide: Structure and in Vitro Release”, *Appl. Clay Sci.*, **49** (2010), 324-329.
- ¹¹ J.U. Ha, M. Xanthos, “Drug release Characteristics from Nanoclay Hybrids and their Dispersions in Organic Polymers”, *Int. J. Pharm.*, **414** (2011), 321-331.
- ¹² L. Perioli, G. D’Alba, C. Pagano, “New Oral Solid Dosage Form for Furosemide Oral Administration”, *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, **80** (2012), 621-629.
- ¹³ J.H. Choy, S.Y. Kwak, Y.J. Jeong, J.S. Park, “Inorganic Layered Double Hydroxides as Nonviral Vectors”, *Angew Chem.*, **39** (2000), 4041-4045.
- ¹⁴ E.J. Sontheimer, R.W. Carthew, “Silence from Within: Endogenous siRNAs and miRNAs”, *Cell*, **122** (2005), 9-12.
- ¹⁵ K. Ladewig, M. Niebert, Z.P. Xu, P.P. Gray, G.Q.M. Lu, “Efficient siRNA delivery to mammalian cells using layered double hydroxide nanoparticles”, *Biomater.*, **31** (2010), 1821-1829.
- ¹⁶ Y. Guo, H. Liu, Y. Li, G. Li, Y. Zhao, Y. Song, Y. Li, “Controlled Core-Shell Structure for Efficiently Enhancing Field-Emission Properties of Organic-Inorganic Hybrid Nanorods”, *J. Phys. Chem. C*, **113** (2009), 12669-12673.
- ¹⁷ J.M. Lee, D.G. Lee, S.J. Lee, J.H. Kim, I.W. Cheong, “One-Step Synthetic Route for Conducting Core-Shell Poly(styrene/pyrrole) Nanoparticles”, *Macromolecules*, **42** (2009), 4511-4519.
- ¹⁸ W. Kang, H. Li, Y. Yan, P. Xiao, L. Zhu, K. Tang, Y. Zhu, Y. Qian, “Worm-Like Palladium/Carbon Core-Shell Nanocomposites: One-Step Hydrothermal Reduction-Carbonization Synthesis and Electrocatalytic Activity”, *J. Phys. Chem. C*, **115** (2011), 6250-6256.
- ¹⁹ K.S. Oh, S.K. Han, H.S. Lee, H.M. Koo, R.S. Kim, K.E. Lee, S.S. Han, S.H. Cho, S.H. Yuk, “Core/Shell Nanoparticles with Lecithin Lipid Cores for Protein Delivery”, *Biomacromolecules*, **7** (2006), 2362-2367.
- ²⁰ X. Xia, J. Tu, Y. Zhang, X. Wang, C. Gu, X. Zhao, H.J. Fan, “High-Quality Metal Oxide Core/Shell Nanowire Arrays on Conductive Substrates for Electrochemical Energy Storage”, *ACS Nano*, **6** (2012), 5531-5538.
- ²¹ A.N. Ay, B. Zümreoglu-Karan, A. Temel, V. Rives, “Bioinorganic Magnetic Core-Shell Nanocomposites Carrying Antiarthritic Agents: Intercalation of Ibuprofen and Glucuronic Acid into Mg-Al-Layered Double Hydroxides Supported on Magnesium Ferrite”, *Inorg. Chem.*, **48** (2009), 8871-8877.

*mjmartinez@ipn.mx



Lesly Ivonne Preciado, Serie Poesía, 2011, fotografía digital.

Hacia la nanociencia verde: nanomateriales, nanoproducidos y nanorresiduos

Carlos Felipe Mendoza* y Laura Meraz Cabrera, Departamento de Biociencias e Ingeniería, CIEMAD-IPN.

Escasez de los recursos naturales

Debido a que los recursos naturales del planeta son limitados, es necesario minimizar su consumo para preservarlos. La síntesis de materiales tradicionalmente ha implicado el consumo de materias primas vírgenes extraídas de la tierra, por lo que deberá incentivarse la cultura de la valoración y aprovechamiento de los residuos susceptibles de tratamiento, como una forma de contribuir a la disminución de la explotación de los recursos no renovables.

Los procesos productivos involucrados en la ciencia de los nanomateriales

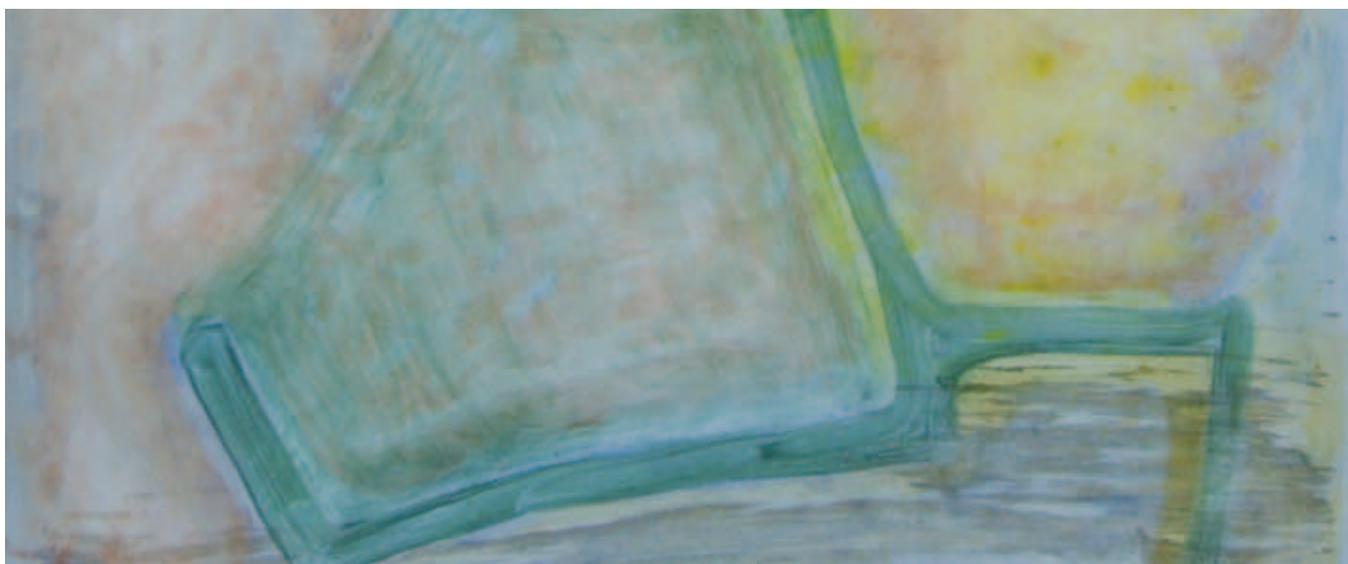
Durante la síntesis de nanomateriales a escala de laboratorio se genera conocimiento sobre las tecnologías y mecanismos que mejoran e innovan los procesos de síntesis. Esta síntesis es el preámbulo de un proceso a escala industrial, que es sólo una de las etapas del proceso productivo conformado por un conjunto mucho más complejo de actividades para producir bienes y servicios competitivos.¹ En esta etapa se busca minimizar el consumo de recursos naturales, aprovechar al máximo la energía involucrada en los procesos, sistematizar y controlar dichos

procesos, alcanzar estándares elevados de calidad y seguridad, así como disminuir la emisión de contaminantes al ambiente.

Preparación de nuevos nanomateriales

En la actualidad existen bastantes razones por las que se desea sintetizar materiales nanoestructurados. El comportamiento de los materiales a escala nanométrica difiere notablemente de los materiales microscópicos, debido principalmente al arreglo de los átomos en un volumen relativamente pequeño y su relativamente grande área específica superficial. Para la obtención de nanomateriales se busca diseñar el mecanismo de síntesis más adecuado,^{2,3} de tal manera que las propiedades fisicoquímicas de los nanomateriales se produzcan a la medida y de acuerdo con la aplicación que se les quiere dar. Sin embargo, esas propiedades tan anheladas también tienen efectos negativos sobre la salud de las personas y organismos que tienen contacto con los nanomateriales. La identificación de los riesgos y la evaluación de la toxicidad asociada a la manipulación y uso de las nanoestructuras son aún incipientes.

Por otro lado, los nanoproducidos⁴ son productos novedosos de uso común y de tecnología de vanguardia a los cuales se les



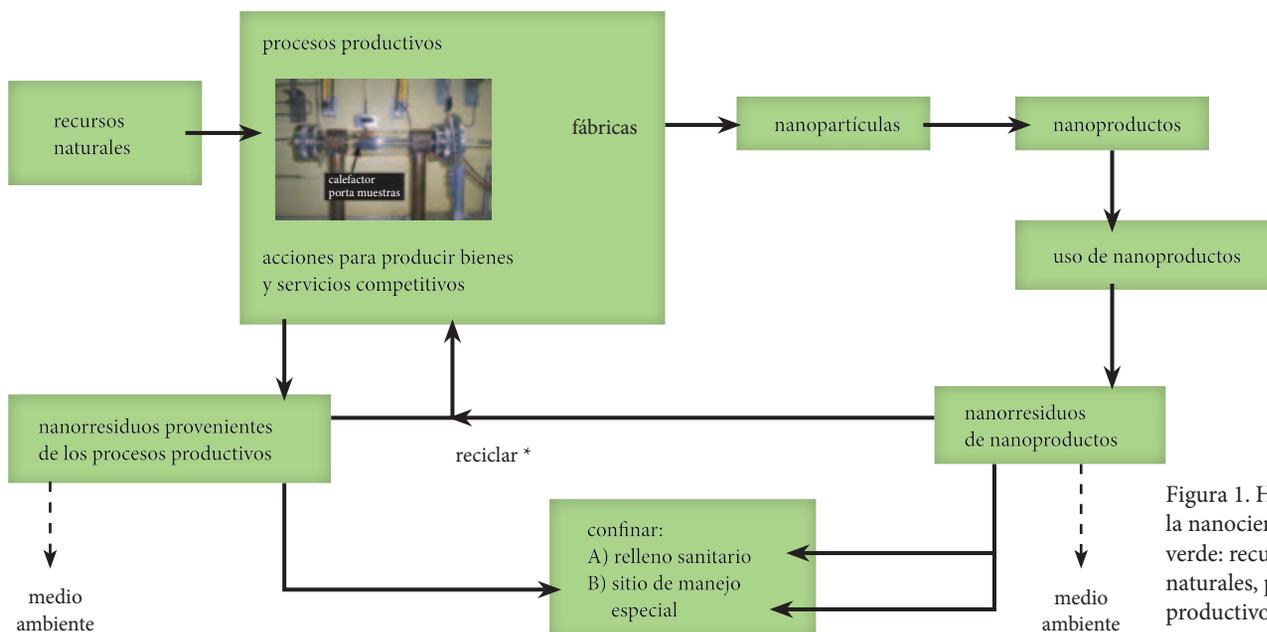
Gilda Castillo, *Sin título* (detalle).

incorporan nanomateriales durante su fabricación. La utilización de nanomateriales para producir productos comerciales, como los dispositivos electrónicos, provee beneficios sociales, pero también afecta negativamente el medio ambiente, la salud y la seguridad de los consumidores. Por ejemplo, en el campo de la salud,⁵ si bien el uso de nanopartículas posibilita la detección de pequeñas cantidades de sustancias dañinas y agentes infecciosos en el cuerpo humano, debido a la mayor capacidad resolutoria de los instrumentos, en contraposición, la exposición a las nanopartículas permite que éstas atraviesen fácilmente las barreras de los sistemas de protección del organismo humano (cutáneas y pulmonares); lo que dificulta la curación, pues están fuera del alcance de las terapias actuales. Otro ejemplo es la utilización de nanomateriales en el campo del saneamiento ambiental, que permite la eliminación de compuestos no deseados y nocivos presentes en el suelo, el agua y el aire; sin embargo, el desconocimiento del ciclo de vida⁶ de los productos producidos mediante tecnologías nanométricas, impiden por el momento conocer sus efectos tóxicos en los organismos vivos.

Nanoproductos y nanorresiduos: la basura del futuro

Los nanorresiduos son aquellos materiales generados durante los procesos productivos cuyos tamaños son del orden de los nanómetros. También se consideran nanorresiduos los nanoproductos cuya vida útil ha terminado y que se desecharán.

Hacia una nanociencia verde



* Reciclar: segregar, desmantelar, reusar, extraer, purificar, recuperar, valorización energética (combustión).

La industria de los materiales y los procesos productivos involucrados en la manipulación de nanomateriales, que los incorporan a la fabricación de nuevos productos, son básicamente los generadores de nanorresiduos en los sitios de producción, ya que en sus procesos los obtienen como subproductos indeseables o como fugas en los sistemas de producción. También los consumidores, al utilizar y desechar los nanoproductos, generan este tipo de residuos (figura 1).

Las nanopartículas detectan sustancias dañinas en el organismo

En la actualidad, el conocimiento sobre los nanorresiduos es incipiente y por eso no existen normas, reglamentos de seguridad ni directivas referentes a su eliminación. En México, la legislación prevé claramente que los residuos peligrosos con características CRETIB (corrosivo, reactividad, explosividad, tóxico, inflamable, biológico infeccioso) deberán tratarse o colocarse en sitios de confinamiento especial, por lo que los nanorresiduos generados *in situ* durante los procesos productivos son susceptibles de tener el mismo trato. Sin embargo, hay una laguna en la legislación, pues no contempla qué hacer con los nanoproductos desechados.

No hay una ley o reglamento que específicamente se refiera

Figura 1. Hacia la nanociencia verde: recursos naturales, procesos productivos, nanomateriales, nanoproductos y nanorresiduos.

a la recolección o tratamiento de los nanorresiduos; sin embargo, es de suponer que son susceptibles de regirse por las ordenanzas existentes tanto para los residuos peligrosos, en el caso de los nanorresiduos, como para los residuos sólidos urbanos, en el caso de los nanoprodutos desechados. Aunque deberán realizarse estudios para comprobar que eso es lo más conveniente.

En el ámbito mundial hay muchos estudios sobre la manera de fabricar nanoestructuras y su implementación para lograr productos de tecnología avanzada. También se conocen con certeza los subproductos que se generan en esos procesos. Lo que ya no está del todo claro es lo que se hace con los nanorresiduos generados; se puede suponer que cada país les da el trato que marca su respectiva legislación, pero no se encuentra evidencia de la manera correcta de manipular los nanorresiduos. En el caso especial de México, por el momento la legislación no ha abordado de forma puntual este asunto pues, para citar sólo un ejemplo, por ningún lado en la legislación aparece si los nanoprodutos desechados (televisiones, mezclillas, empaques y en general productos de uso común con nanopartículas incorporadas) deberán confinarse en los rellenos sanitarios o en sitios de confinamiento especial.

Comentarios finales

Las nanopartículas fabricadas o usadas en los procesos productivos podrían ser liberadas como efluentes al aire, el suelo y los cuerpos de agua, lo que afectaría gravemente el ciclo del agua, la vegetación y las especies en contacto con ellas y, por lo tanto, se pondría en riesgo la seguridad alimentaria y la salud humana.

Los nanorresiduos pueden ser peligrosos y todavía no se legisla sobre su confinación

Con la finalidad de disminuir los riesgos y toxicidad en las personas, causada por la exposición a los nanomateriales por vía oral, cutánea o inhalación, es necesario implementar estrategias para un manejo seguro en cada una de las etapas de la manipulación, mediante la identificación de los peligros existentes cuando se usan nanomateriales. Así, la legislación deberá regular la fabricación, el uso, la recolección, el transporte y el tratamiento de los nanomateriales, así como la disposición final de los nanorresiduos.

La investigación está obligada a desarrollar mejores prácticas en la síntesis y manipulación de los nanomateriales para



Gilda Castillo, *Sin título* (detalle).

preservar el ambiente, la salud y la seguridad. Es necesario reemplazar en lo posible los nanomateriales vírgenes por nanomateriales reciclados y sustituir el sistema lineal de “sacar-fabricar-tirar”¹ por el ciclo cerrado (figura 1), en el cual los nanomateriales se reutilizan infinitamente, de modo que se eliminan los desechos con la finalidad de dirigirse hacia la práctica de la nanociencia verde.

Bibliografía

¹ A. Leonard, *La historia de las cosas*, Buenos Aires, Fondo de Cultura Económica, 2010.

² O. Goiz, F. Chávez, C. Felipe, N. Morales, R. Peña-Sierra; “Synthesis of Molybdenum Oxide Microsheets via Close-Spaced Vapor Transport”, *Materials Science and Engineering B*, **174** (2010), 174-176.

³ O. Goiz, F. Chávez, C. Felipe, R. Peña-Sierra, N. Morales; “CSVT as Technique to Obtain Nanostructured Materials: WO_{3-x}”, *Journal of Nano Research*, **9** (2010), 31-37.

⁴ G. Bystrzejewska-Piotrowska, J. Golimowski, P.L. Urban, “Nanoparticles: Their Potential Toxicity, Waste and Environmental Management”, *Waste Management*, **29** (2009), 2587-2595.

⁵ J.R. Peralta-Videa, L. Zhao, M.L. López-Moreno, G. Rosa, J. Hong, J.L. Gardea-Torresdey, “Nanomaterials and the Environment: A Review for the Biennium 2008-2010”, *Journal of Hazardous Materials*, **186** (2011), 1-15.

⁶ C. Som, M. Berges, Q. Chaudhry, M. Dusinska, T.F. Fernandes, S.I. Olsen, B. Nowack, “The Importance of Life Cycle Concepts for the Development of Safe Nanoprodutos”, *Toxicology*, **269** (2010), 160-169.

*cfelipe98@gmail.com



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.



Materials Research Society
The Materials Gateway



SYMPOSIA

1. NANO SCIENCE AND TECHNOLOGY

- 1A. Low Dimensional Bismuth-based Materials
- 1B. Nanostructured Carbon Materials for MEMS/NEMS and Nano-Electronics
- 1C. Nanostructured Materials and Nanotechnology

2. MATERIALS CHARACTERIZATION

- 2A. The Role of Surfaces and Interfaces in Materials Processing
- 2B. Novel Characterization Methods for Biological Systems
- 2C. Quantitative Measurements with AFM in Fluids
- 2D. Structural and Chemical Characterization of Metals Alloys and Compounds

3. MATERIALS FOR ENERGY PRODUCTION

- 3A. Materials for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells
- 3B. Photocatalytic and Photoelectrochemical Nanomaterials for Sustainable Energy
- 3C. Photovoltaics, Solar Energy Materials and Technologies
- 3D. New Catalytic Materials
- 3E. Renewable Energy and Sustainable Development

4. BIOMATERIALS

- 4A. Nanotechnology-enhanced Biomaterials and Biomedical Devices
- 4B. Biomaterials for medical applications

5. POLYMERS

- 5A. Soft Responsive Materials
- 5B. New Trends in polymer chemistry and characterization

6. ELECTRONICS AND PHOTONICS

- 6A. Organic Materials for Electronics and Photonics
- 6B. Low Dimensional Semiconductor Structures
- 6C. Advances in Semiconducting Materials
- 6D. Materials and Devices for Large Area Electronics

7. FUNDAMENTAL MATERIALS SCIENCE

- 7A. Advances in Computational Materials Science
- 7B. Concrete with Smart Additives and Supplementary Cementitious Materials
- 7C. NACE: Corrosion and Metallurgy
- 7D. Advanced Structural Materials
- 7E. Interfaces, Structure, and Domain Engineering in Ferrous Systems
- 7F. Solid State Chemistry of Inorganic Materials

8. GENERAL

- 8A. Strategies for Academy-Industry Relationship

12 - 17
August
2012
CANCUN
MEXICO

Hotels

JW Marriott

Casa Magna Marriott

<http://www.mrs-mexico.org.mx>

Depósito de nanomateriales sobre fibras ópticas

Plácido Zaca Morán, Físicoquímica de Materiales-ICUAP, BUAP.

Introducción

La luz ha sido uno de los fenómenos más estudiados por la ciencia, históricamente se ha considerado de naturaleza corpuscular, ondulatoria, y hasta se propuso un medio para su propagación llamado éter. La solución a esta paradoja la ofreció J.C. Maxwell en 1865, con el análisis de su teoría electromagnética que demostraba que la luz es una onda capaz de propagarse en el vacío a una velocidad de 299,792,458 m/s resolviendo así el problema del éter y el descubrimiento de nuevas ondas.¹ El estudio de esta teoría nueva no sólo pudo demostrar que la luz está formada por ondas sino que además puede ejercer presión al propagarse.

Independientemente del comportamiento específico de la luz, ondulatorio o corpuscular, se sabe que ésta es portadora tanto de energía como de momento lineal, conservándose ambas cantidades en cualquier proceso de interacción entre radiación y materia, lo que dio origen a otra gran teoría: la mecánica cuántica. En este contexto, los trabajos principalmente de A. Einstein y M. Planck llevaron a la conclusión de que, bajo ciertas circunstancias, la luz también se comporta como un flujo de partículas, llamadas fotones, y se asocia cada fotón a una

propiedad física llamada momento lineal. El efecto total de los fotones al interactuar con un objeto es lo que se conoce como presión de radiación, efecto que ya en el siglo pasado se intentó medir para determinar la presión ejercida por la luz sobre un cuerpo, pero ésta fue demasiado débil para ser detectada debido a que se requerían equipos y técnicas experimentales muy precisas para detectarla, así como fuentes luminosas adecuadas, lo que dificultó su medición.²

La historia cambió cuando apareció el láser en 1960, en gran parte por el hecho de que la radiación que emite es casi monocromática y coherente. Es decir, el láser es una fuente de luz formada por un conjunto de ondas, la mayoría oscilando a una misma longitud (un solo color) mientras viajan simultáneamente.^{3,4} Estas propiedades del láser facilitan la concentración de una gran potencia a lo largo de una dirección bien definida, lo que permite generar una presión de radiación de hasta seis órdenes de magnitud mayor en una superficie en comparación con la luz del sol. Sin embargo, la presión de radiación sigue siendo insignificante para objetos macroscópicos, pero llega a ser de gran importancia al actuar sobre objetos suficientemente pequeños.



Ana Luisa Solís Gargollo, *Soñando Despierta*, fotografía, 2012 (detalle).

Haces contrapropagados

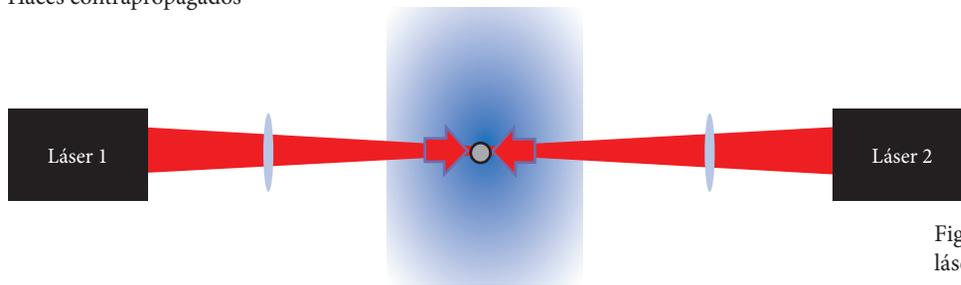


Figura 1. Arreglo experimental de dos láseres colocados en contrapropagación para afectar la dinámica de partículas.

Diez años después de la invención del láser, A. Ashkin demostró la posibilidad de usar la presión de radiación mediante un láser de luz visible para afectar la dinámica de partículas micro y nanométricas.⁵ En su experimento, utilizó microesferas transparentes suspendidas en agua para evitar efectos de calentamiento por la absorción de la luz. Asombrosamente, no sólo encontró que la presión de radiación era capaz de empujar las partículas en la dirección de propagación del haz láser, sino que también las partículas eran atraídas hacia el centro en la dirección transversal hacia las zonas más intensas. Partiendo de estos resultados, Ashkin decidió colocar dos haces de luz en contrapropagación (direcciones opuestas) a lo largo de un eje horizontal, de modo que las fuerzas ejercidas por cada uno de los láseres se equilibren entre sí en algún punto intermedio en donde la partícula es atrapada por la luz, como se muestra en la figura 1. Estos descubrimientos marcaron el inicio de lo que hoy se ha convertido en una de las áreas de mayor importancia para la ciencia y la tecnología: la manipulación óptica, comúnmente llamada “pinzas ópticas”. Años más tarde Ashkin y sus

colaboradores pudieron atrapar y manipular organismos vivos como virus, bacterias, protozoos y hasta motores moleculares mediante fuerzas muy pequeñas en el rango de una fracción de piconewtons ($\sim 1 \times 10^{-12}$ N). Con el estudio de estas fuerzas, la óptica ha ido más allá de un análisis detallado de las características y manifestaciones de la luz al interactuar con la materia, particularmente con los materiales nanoestructurados.

La presión de radiación de la luz actúa sobre objetos muy pequeños

En el presente trabajo se muestra la relevancia del estudio de la presión de radiación sobre los materiales nanoestructurados para llevar a cabo procesos de manipulación, selección y la implementación de películas delgadas sobre fibras ópticas. Los resultados del estudio están orientados para aplicaciones en el área de las comunicaciones por fibras ópticas: filtros, divisores, espejos y dispositivos de absorción saturable. La originalidad de la propuesta radica en que se abre una nueva posibilidad para combinar directamente las propiedades de los materiales nanoestructurados implementados sobre fibras ópticas mediante la manipulación óptica, proponiendo un sistema fácil y de bajo costo.

Presión de radiación

En la década de los setenta y principios de los ochenta, se iniciaron los estudios para comprender mejor los fundamentos físicos de la presión de radiación de fuentes coherentes y su influencia en materiales a escalas muy pequeñas. El resultado fue la identificación de un componente perpendicular al eje de propagación que conduce a las partículas hacia las regiones de máxima intensidad conocido como fuerza de gradiente y otro componente que las empuja hacia adelante a lo largo del eje llamado fuerza de esparramiento. Es decir, la fuerza total que ejerce la radiación sobre un objeto básicamente se compone de dos fuerzas: la de esparramiento, que es la encargada de empu-



Ana Luisa Solís Gargollo, *Soñando Despierta*, fotografía, 2012 (detalle).

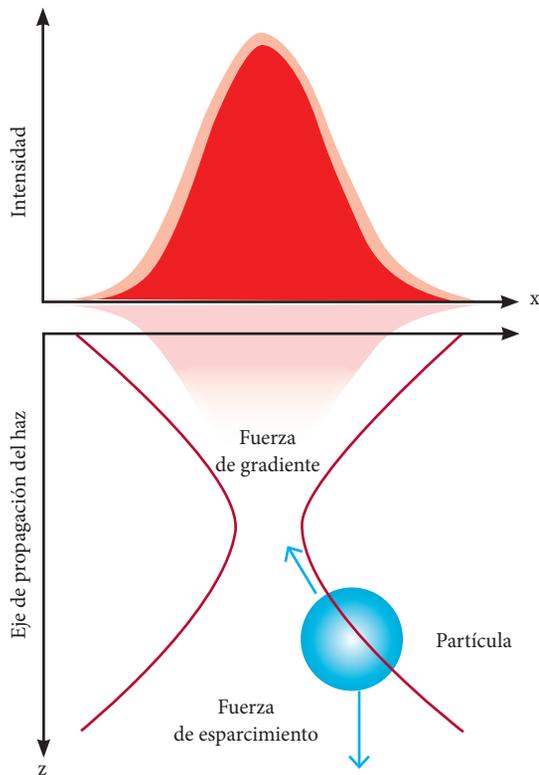


Figura 2. Diagrama esquemático de una partícula bajo la influencia de la presión de radiación.

jar la partícula en la dirección de propagación del haz, y la de gradiente, que tiene su origen en las variaciones de intensidad de la fuente y conduce las partículas hacia regiones de máxima intensidad, efecto que se muestra en la figura 2. De acuerdo con la figura, la partícula se moverá hacia el centro de la cintura del haz, región en donde la suma de las fuerzas puede llegar a un estado de equilibrio, lo que significa que la fuerza de absorción tendrá una magnitud igual pero en sentido contrario que la fuerza de gradiente, dando como resultado la inmovilidad de la partícula. Las ecuaciones asociadas a estas fuerzas están dadas por las siguientes expresiones:

$$F_{grad} = \frac{1}{2} \alpha'(\omega) \nabla \langle E^2 \rangle \quad (1)$$

$$F_{esp} = \frac{n}{c} \langle S \rangle \frac{k^4}{6\pi\epsilon_0^2} |\alpha(\omega)|^2$$

$$F_{espar}(r) = \frac{\hat{z}n_2}{c} \frac{8}{3} \pi(ka)^4 a^2 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 I(r) \quad (2)$$

donde $\alpha(\omega) = \alpha'(\omega) + i\alpha''(\omega)$ es la polarizabilidad compleja que relaciona el índice de refracción del medio y la partícula, $\langle S \rangle$ es el vector de Poynting que representa la intensidad de

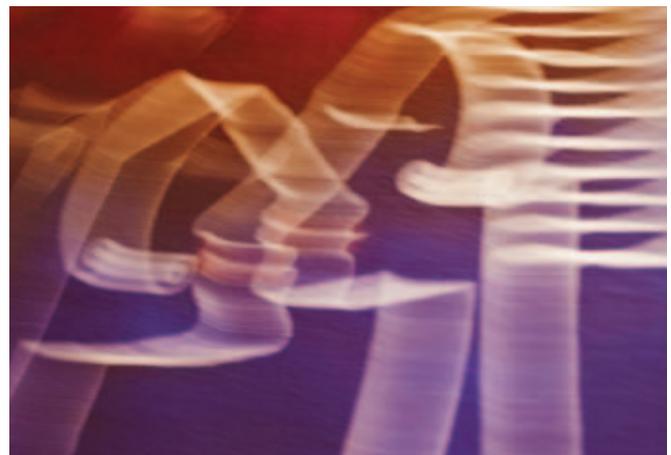
radiación sobre un área determinada, n es el índice de refracción del medio, c es la velocidad de la luz, k el vector de onda del medio que describe la dirección de propagación de la fuente, ϵ_0 es la permisividad en el vacío y $\nabla(E^2)$ es el gradiente del campo eléctrico que describe la relación de potencia de la fuente de radiación en función de sus coordenadas espaciales.⁶

El desarrollo de la nanotecnología ha permitido crear nanoestructuras con diferentes propiedades fisicoquímicas de materiales dieléctricos, semiconductores o metálicos y morfologías tan variadas como nanoesferas, nanotubos, nanoalambres, etc. Si a esta situación le añadimos la necesidad de una solución como medio de suspensión para una adecuada manipulación de los materiales nanoestructurados, la fuerza resultante expresada por la suma de las ecuaciones (1) y (2) se complica, en parte por la absorción espectral que actúa sobre una partícula y en parte debido a las propiedades de la solución, lo que implica adicionar una fuerza de absorción a las ya descritas, que se expresa como:

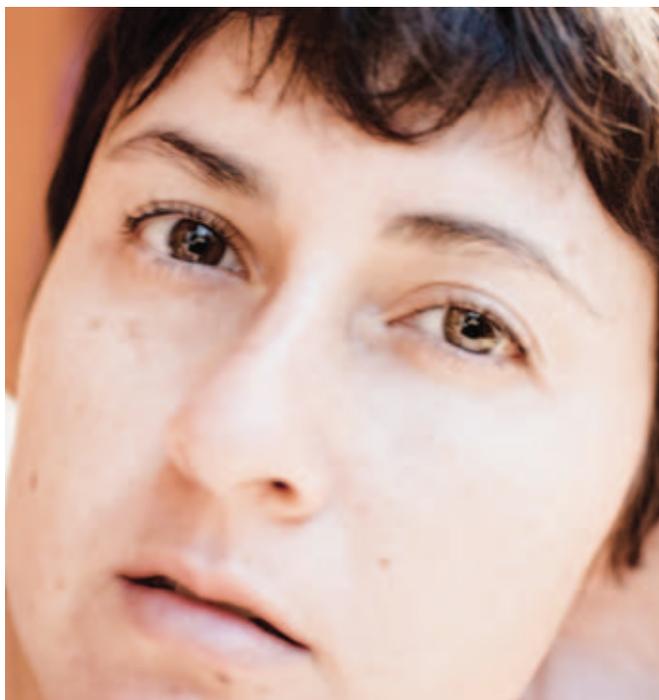
$$F_{abs} = \frac{n}{c} \langle S \rangle \frac{k}{\epsilon_0} \alpha''(\omega) \quad (3)$$

donde la parte imaginaria de la polarizabilidad $\alpha''(\omega)$ representa el término complejo del índice de refracción de los materiales con propiedades de absorción, como los materiales metálicos.

La absorción de la radiación, ocasionada generalmente por las partículas metálicas, se ha asociado al calentamiento significativo tanto del medio como de las partículas mismas, lo que dificulta su control. Esta absorción da origen a fuerzas térmicas no deseadas que obedecen a la Ley de Stokes, que describe la fuerza de fricción que experimentan los objetos esféricos moviéndose a velocidades bajas en un fluido, expresada por



Ana Luisa Solís Gargollo, *Soñando Despierta*, fotografía, 2012 (detalle).



Ana Luisa Solís Gargollo, *Soñando Despierta*, fotografía, 2012 (detalle).

$F_s = 6\pi R\eta v$, donde R es el radio de curvatura de la partícula esférica, η es la viscosidad y v es la velocidad.

Es claro que la presión de radiación está compuesta por la resultante de una serie de fuerzas que afectan el desplazamiento de la partícula, $F_T = F_{grad} - F_{esp} - F_{abs} - F_s - F_{\dots}$ y que finalmente determina su movimiento, cuya dependencia está intrínsecamente relacionada con las propiedades tanto del material como del medio. La implementación práctica de este fenómeno, técnicamente hablando, es concentrar una fuente de radiación, como la de un láser, en un área en donde los materiales nanoestructurados podrán ser atrapados, movidos o manipulados. Esta sencilla técnica de depósito de materiales nanoestructurados sobre fibras ópticas se ha desarrollado en nuestro laboratorio y puede ser útil para la implementación de dispositivos de fibras ópticas como espejos, divisores, filtros, absorbentes saturables, etcétera.

Depósito de nanoestructuras sobre fibras ópticas

Una fibra óptica es un medio para transmitir luz por efectos de reflexión total interna, está fabricada a base de un delgado hilo de vidrio compuesto por un núcleo y un revestimiento, con propiedades ópticas que generalmente no permiten filtrar, modular o detectar la luz por sí solas, a menos que se utilicen sistemas externos que interactúen con las fibras ópticas. Por esta razón, en el laboratorio de fisicoquímica de materiales del ICUAP se llevan a cabo estudios teóricos y experimentales so-

bre los procesos de síntesis y depósito de materiales nanoestructurados sobre fibras ópticas usando fuentes de radiación coherente con la finalidad de obtener una óptica integrada directamente sobre las fibras.

La configuración básica del arreglo experimental propuesto para realizar depósitos de nanomateriales sobre el núcleo de una fibra óptica se muestra en la figura 3. El arreglo consiste en un haz láser transmitido a través de una fibra óptica, cuyo cono de radiación de salida es capaz de afectar la dinámica de las partículas que quedan bajo la influencia de la fuente de radiación. Suponiendo que una partícula quede bajo los efectos de este cono de radiación, la partícula podrá experimentar un movimiento hacia las zonas de mayor intensidad y en consecuencia hacia el núcleo de la fibra, siempre y cuando la fuerza de gradiente sea lo suficientemente intensa.

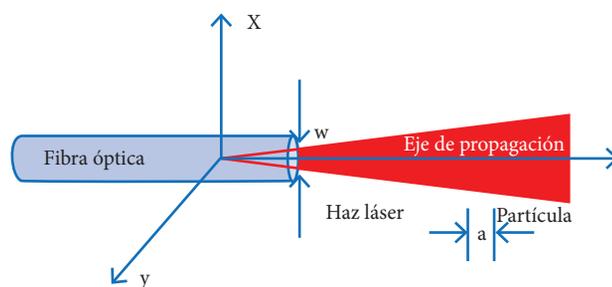


Figura 3. Diagrama en que se muestra una partícula bajo la influencia de un haz láser transmitido a través de una fibra óptica.

Los resultados analíticos de una nanopartícula dieléctrica inmersa en una solución bajo la influencia de una fuente de radiación coherente emitida a través de una fibra han mostrado que dentro del cono de luz generado por la emisión existe una zona localizada en el centro, donde la magnitud de la fuerza $-Fz$ es máxima, que disminuye hacia los extremos, como se muestra en la figura 4. Es decir, cuando una partícula queda

Las fibras ópticas transmiten luz por efectos de la reflexión total

bajo la influencia de una fuente de radiación, podrá experimentar un movimiento hacia las zonas de mayor intensidad, desplazándose hacia el centro del haz y al mismo tiempo hacia la dirección de la fuente de emisión, que en este caso se encuentra localizada en el núcleo de la fibra. El resultado es la posibilidad de manipulación, selección y depósito de partículas mediante el efecto de la presión de radiación de un láser de fibra óptica.

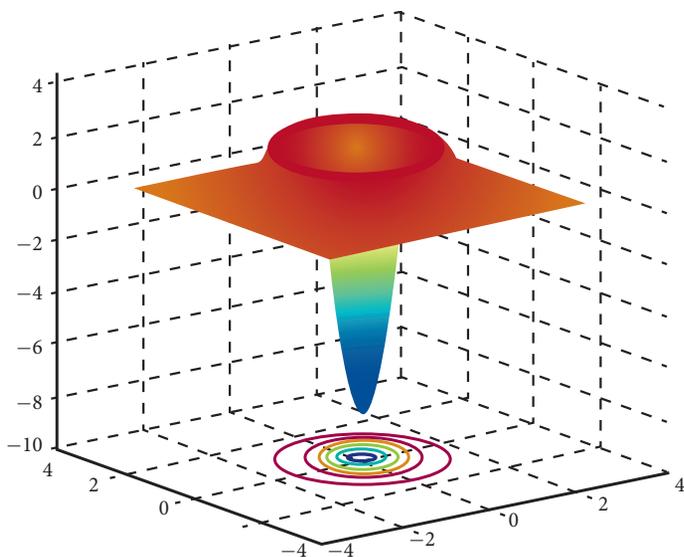


Figura 4. Distribución de la fuerza transversal que experimenta una nanopartícula dieléctrica por efectos de la radiación del haz transmitido a través de una fibra óptica.

El arreglo experimental consiste en hacer propagar un haz a través de una fibra y sumergir la salida en una solución en la que previamente se hallan mezcladas las nanopartículas, como se muestra en la figura 5. En el arreglo se utiliza un driver de control, que es un sistema electrónico para estabilizar el láser en corriente y temperatura, además de un controlador de polarización para maximizar la transmisión de potencia a la salida.

La radiación láser afecta la dinámica de las partículas

Esta técnica de depósito ha sido empleada con éxito en forma experimental sobre fibras ópticas y se ha comprobado que no está restringida a un solo tipo de materiales ni tampoco a

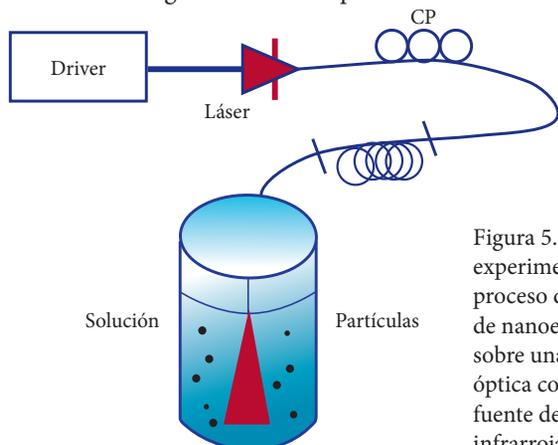


Figura 5. Arreglo experimental para el proceso de depósito de nanoestructuras sobre una fibra óptica con una fuente de radiación infrarroja.

una morfología en particular, ya que se han logrado realizar depósitos de nanopartículas de oro, zinc y hasta nanotubos de carbono y óxido de tungsteno (WO).

Los análisis de la morfología superficial de las nanoestructuras depositadas han sido realizados con microscopía de barrido electrónico (SEM), óptica y de fuerza atómica (AFM). Un SEM es un microscopio que permite obtener imágenes de alta resolución utilizando un haz de electrones para formar una imagen a través de una computadora. Un microscopio óptico está basado en la formación de imágenes a través de una fuente de iluminación y el empleo de lentes, y un AFM es el tipo de microscopio que se usa para monitorear la morfología superficial o topografía de un objeto, su funcionamiento se basa en el movimiento mecánico de una punta o cantiléver que interactúa con la superficie de una muestra, similar al funcionamiento de un tocadiscos.

En la figura 6 se muestra una serie de imágenes de la morfología obtenida de las fibras ópticas, vistas de frente, de algunos materiales que se han logrado depositar. En las figuras 6a y d se observan imágenes de una fibra sin depósito obtenida a través del SEM y el microscopio óptico, respectivamente, en el que se observa la ausencia de materiales depositados. En las figuras 6b y e se muestran las imágenes del SEM de una fibra con depósitos de nanoesferas de oro y la imagen del microscopio óptico de una fibra con nanoesferas de zinc, respectivamente; los resultados obtenidos se llevaron a cabo usando una fuente infrarroja a baja potencia comprendida entre 5-10 mW. En las figuras 6c y f se muestran las imágenes del SEM de una fibra



Ana Luisa Solís Gargollo, *Soñando Despierta*, fotografía, 2012 (detalle).

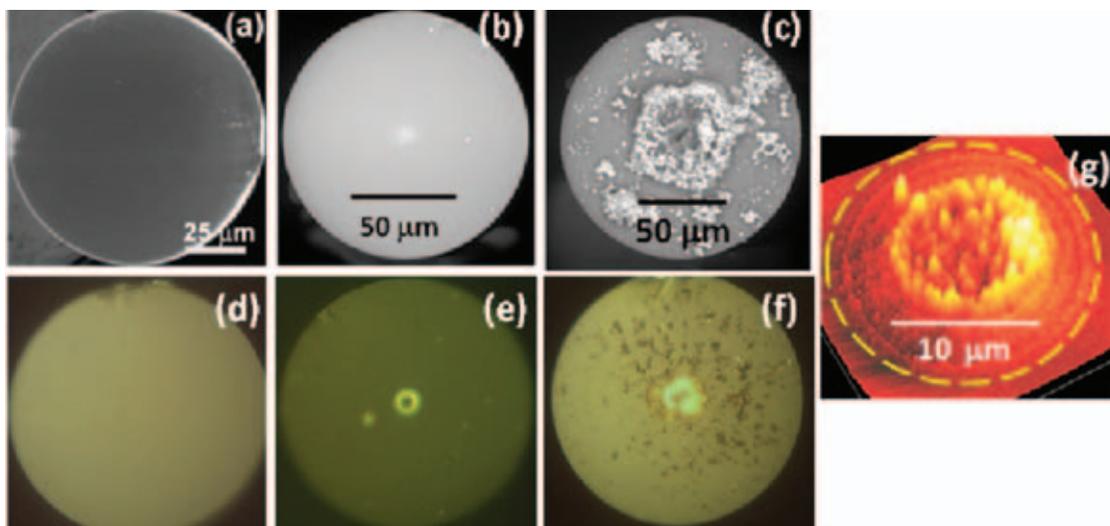


Figura 6. *a, b, c*) Imágenes del SEM para una fibra sin depósito, con nanopartículas de oro y de WO₃, respectivamente. *d, e, f*) Imágenes del microscopio óptico de una fibra sin depósito, con nanopartículas de zinc y oro respectivamente. *g*) Imagen del AFM de las nanopartículas de zinc mostradas en *e*.

con depósitos de nanoesferas de WO₃ y la imagen óptica de una fibra con nanoesferas de oro, respectivamente; los resultados obtenidos se llevaron a cabo usando una fuente infrarroja y potencias de aproximadamente 100 mW. Finalmente, en la figura 6g se muestra la imagen obtenida con el AFM de la muestra 6e, en el que se observa una imagen más detallada de la distribución radial del núcleo de la fibra con las nanoesferas de zinc depositadas.

Los análisis se realizan con microscopía de barrido electrónico

Esta técnica puede ser utilizada para la integración de dispositivos implementados directamente sobre fibras ópticas mediante la manipulación, con base en la presión generada por medio de un láser, y es un sistema fácil y de bajo costo para el desarrollo de espejos, divisores, filtros y absorbentes saturables, entre otros.

Conclusiones

La interacción de la luz con nuestro entorno ha dejado de ser un elemento mágico o misterioso para convertirse en un fenómeno con determinadas características físicas, cuyo origen puede ser explicado con base en los efectos que se pueden predecir para explorar nuevos mundos que giran en torno a lo pequeño. Si bien no se ha dicho todo acerca de la luz, se ha logrado conocer mejor el fenómeno óptico y se ha profundizado en el conocimiento referente a la interacción de la luz y la materia, lo que amplía el espectro de aplicaciones de la óptica. Aunque el propósito de este artículo es motivar al lector interesado en el tema del depósito de películas delgadas mediante la

presión de radiación, se ha tratado desde un punto de vista muy general aunque puede haber sorpresas, y seguramente el futuro nos tiene reservados nuevos descubrimientos interesantes en torno de la luz.

Bibliografía

- ¹ D.W. Ball, "The Baseline, Light: Particle or Wave?", *Spectroscopy*, **21** (2006), 30-33.
- ² M. Mansuripur, "Radiation Pressure and the Linear Momentum of the Electromagnetic Field", *Optics Express*, **12** (2004), 5375-5401.
- ³ L. Hernández, "A medio siglo de la construcción del primer láser", *Revista Cubana de Física*, **28** (2011), 73-76.
- ⁴ N. Bloembergen, "Physical Review Records the Birth of the Laser Era", *Physics Today*, **46** (1993), 28-31.
- ⁵ A. Ashkin, *Optical Trapping and Manipulation of Neutral Particles Using Lasers*, World Scientific, Singapur, 2006.
- ⁶ Y. Harada y Toshimitsu Asakura, "Radiation Forces on a Dielectric Sphere in the Rayleigh Scattering Regime", *Optics Communications*, **124** (1996), 529-541.



Ana Luisa Solís Gargollo, *Soñando Despierta*, fotografía, 2012 (detalle).