



# Materiales y materias primas

## Nanomateriales

Capítulo 12

Guía didáctica

Investigadores

Centro Atómico Constituyentes (CAC)

Centro Atómico Bariloche (CAB)

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

## Autoridades

---

Presidente de la Nación  
**Dra. Cristina Fernández de Kirchner**

Ministro de Educación  
**Dr. Alberto E. Sileoni**

Secretaria de Educación  
**Prof. María Inés Abrile de Vollmer**

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica  
**Lic. María Rosa Almandoz**

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica  
**Lic. Juan Manuel Kirschenbaum**

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional  
**Ing. Roberto Díaz**

---

### **Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.**

Saavedra 789. C1229ACE.  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.  
República Argentina.  
2011

---

Director de la Colección:  
**Lic. Juan Manuel Kirschenbaum**

Coordinadora general de la Colección:  
**Claudia Crowe**

Diseño didáctico y corrección de estilo:  
**Lic. María Inés Narvaja  
Ing. Alejandra Santos**

Coordinación y producción gráfica:  
**Augusto Bastons**

Diseño gráfico:  
**María Victoria Bardini  
Augusto Bastons  
Martín Alejandro González  
Federico Timerman**

Ilustraciones:  
**Diego Gonzalo Ferreyro  
Martín Alejandro González  
Federico Timerman**

Administración:  
**Cristina Caratozzolo  
Néstor Hergenrether**

Colaboración:  
**Jorgelina Lemmi  
Psic. Soc. Cecilia L. Vázquez  
Dra. Stella Maris Quiroga**

---

“Colección Encuentro Inet”.

Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum.

Coordinadora general de la Colección: Claudia Crowe.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Reproducción autorizada haciendo mención de la fuente.

Industria Argentina

---

#### ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición. Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto.

# Colección Materiales y materias primas

Serie producida por el Canal Encuentro junto con el Instituto Nacional de Educación Tecnológica (INET). A lo largo de catorce capítulos\* el ciclo desarrolla el origen, las propiedades, el contexto de descubrimiento y la utilización de diferentes materiales y materias primas, y el impacto que causaron en la vida de la humanidad durante su historia.

Aire, aluminio, hierro, azufre, polímeros, madera, cerámicos son algunos de los protagonistas de esta colección.

## DVD 1

**Capítulo 1**  
Los Materiales y la humanidad

**Capítulo 2**  
Aire

**Capítulo 3**  
Madera

## DVD 2

**Capítulo 4**  
Azufre

**Capítulo 5**  
Minerales de hierro

**Capítulo 6**  
Cerámicos

**Capítulo 7**  
Aluminio

## DVD 3

**Capítulo 8**  
Biomateriales

**Capítulo 9**  
Polímeros

**Capítulo 10**  
Materiales compuestos

## DVD 4

**Capítulo 11**  
Silicio

**Capítulo 12**  
Nanomateriales

\* La versión impresa de la colección **Materiales y materias primas** está constituida por doce capítulos. La parte 1 y 2 de las series **Los materiales y la humanidad** y **Nanomateriales** fueron unificadas respectivamente.

# Índice | Nanomateriales

## 12.1. ¿Qué es la nanotecnología?

- ◆ 12.1.1. Nanotecnología. Un poco de historia
- ◆ 12.1.2. Importancia de la nanotecnología
- ◆ 12.1.3. Aproximación a la nanotecnología

## 12.2. Nanosistemas y microscopía electrónica de transmisión

- ◆ 12.2.1. El dominio de lo nano
- ◆ 12.2.2. El microscopio electrónico de transmisión (tem)
- ◆ 12.2.3. ¿Cómo se obtienen materiales de tamaño de nanómetros?
  - 12.2.3.1. ¿Cuáles pueden ser esos moldes?
  - 12.2.3.2. ¿Cómo se obtienen esos moldes?
  - 12.2.3.3. ¿Por qué esos poros sirven como moldes?
  - 12.2.3.4. ¿Cómo procede la reacción química dentro del poro?
  - 12.2.3.5. ¿Cómo nos quitamos el molde de encima?
  - 12.2.3.6. ¿Para que servirían estos materiales de tamaño nanométrico?
- ◆ 12.3. Aplicaciones de la nanotecnología
  - 12.3.1. Ciencia de los materiales
  - 12.3.2. Medicina
  - 12.3.3. Fabricación de instrumentos para el estudio de las propiedades de la materia a una escala nanométrica
  - 12.3.4. Producción y almacenamiento de energía
  - 12.3.5. Tecnologías de la información
  - 12.3.6. Industria alimenticia
  - 12.3.7. Seguridad

## 12.4. Investigación e impacto de la micro y la nanotecnología en la argentina

- ◆ 12.4.1. El plan espacial argentino.
  - 12.4.1.1. Introducción
  - 12.4.1.2. Mems, nems y nano en el espacio
  - 12.4.1.3. Interfase térmica basada en nanotubos de carbono
  - 12.4.1.4. Interruptor mems de radiofrecuencia
  - 12.4.1.5. ¿Cuál es el sentido de desarrollar este componente en argentina?
  - 12.4.1.6. Más allá o en el resto del mundo

- ◆ 12.4.2. Espectroscopía óptica de nanoestructuras
  - 12.4.2.1. Manipulación de luz y sonido en la nanoescala
  - 12.4.2.2. Espectroscopia amplificada ultrasensible de moléculas
- ◆ 12.4.3. Electrónica molecular
- ◆ 12.4.4. Nanopartículas y nanomateriales por métodos químicos: cómo trabajan los “chefs moleculares”
  - 12.4.4.1. ¿Cómo se hacen estas nanopartículas?
- ◆ 12.4.5. Programa de nanomedicina
  - 12.4.5.1. Aplicaciones en medicina: diagnóstico y tratamiento
- ◆ 12.4.6. Espintrónica: electrónica de espín
  - 12.4.6.1. Transporte eléctrico
  - 12.4.6.2. Ingeniería de nanoestructuras magnéticas artificiales.
  - 12.4.6.3. La magnetorresistencia gigante

### **12.5. Microscopio de fuerza atómica (afm)**

- ◆ 12.5.1. Descripción general
- ◆ 12.5.2. Acercamiento
- ◆ 12.5.3. Puntas
- ◆ 12.5.4. Desplazamiento

### **12.6. Síntesis de nanoestructuras**

- ◆ 12.6.1. Efectos superficiales y anisotropías magnéticas en nanopartículas y nanotubos de óxidos. Nuevos materiales para electrónica de espín.
  - 12.6.1.1. ¿Cuál es el objetivo del grupo?
  - 12.6.1.2. ¿Por qué se investiga la resistencia eléctrica de los óxidos?
  - 12.6.1.2. ¿Por qué se investiga la resistencia eléctrica de los óxidos?
  - 12.6.1.4. ¿Qué otros nanotubos estudian?

### **12.7. Sensores de gases**

- ◆ 12.7.1. El polímero conductor
- ◆ 12.7.2. La tecnología de sensores de óxido metálico

- ◆ 12.7.3. Sensor de gas tipo mos con tecnología mems
  - 12.7.3.1. La tecnología mems o de microsistemas
  - 12.7.3.2. Narices electrónicas.
  - 12.7.3.3. ¿Por qué electrificar el olfato?

## **12.8. Nanobiochip para detección de cáncer, patógenos y mutaciones.**

### **Bibliografía**

## 12. Nanomateriales

### 12.1. ¿QUÉ ES LA NANOTECNOLOGÍA?

Para hablar de nanotecnología, primero es preciso saber qué es un nanómetro. El prefijo *nano* quiere decir  $10^{-9}$ , es decir, una milmillonésima (0,000000001) parte. Un nanómetro (nm) es una milmillonésima parte de un metro. Un nanómetro es decenas de miles de veces más pequeño que el diámetro de un cabello humano. La figura 1 muestra una idea de proporciones y de relación de tamaños.



En esta publicación utilizaremos la palabra *nanotecnología* como término colectivo que abarque las distintas ramas de las nanociencias y de las nanotecnologías.

Aunque muy a menudo se hace referencia a la *ciencia de lo pequeño*, la nanotecnología no implica simplemente estructuras y productos muy pequeños. A menudo, se incorporan a materiales volumétricos y a grandes superficies algunos rasgos y características de la nanoescala.

Conceptualmente, la nanotecnología se refiere a las actividades científicas y tecnológicas llevadas a cabo a escala atómica y molecular, a los principios científicos y a las nuevas propiedades que pueden comprenderse y controlarse cuando se interviene a dicha escala. Estas propiedades pueden observarse y explotarse tanto a escala microscópica como macroscópica, por ejemplo, para el desarrollo de materiales e instrumentos con nuevas funciones y prestaciones.

#### 12.1.1. Nanotecnología. Un poco de historia

En la conferencia que dictó en 1959, el físico (premio Nobel) Richard Feynman dijo que *hay mucho espacio en la parte inferior* (el título original de la conferencia fue *There's plenty of room at the bottom*) y pronosticó que, si en un futuro se pudieran fabricar y manipular materiales de dimensiones atómicas o moleculares, se podrían realizar una asombrosa cantidad de nuevos descubrimientos. En aquella conferencia, Feynman abordó los beneficios que supondría para la sociedad el hecho de que fuéramos capaces de manipular la materia y fabricar artefactos con una precisión de unos pocos átomos, lo que corresponde a una dimensión de 1 nm, aproximadamente.

Cuarenta años después de aquella conferencia, los expertos que trabajan en el campo de la na-

notecnología están empezando a poner en práctica algunas de las ideas propuestas originalmente por Feynman, y muchas más que en ese entonces no se tenían previstas.

Hubo que esperar algunos años más para que el avance en las técnicas experimentales, culminado en los años 80 con la aparición de la *Microscopía Túnel de Barrido (STM)* o la *de Fuerza Atómica (AFM)*, hiciera posible, primero, observar los materiales a escala atómica y, después, manipular átomos individuales.

El gran impulso del mundo de la nanotecnología fue la *manipulación atómica realizada* por parte del equipo de IBM. En 1981, creó un instrumento llamado *microscopio de barrido de efecto túnel* que permitía captar una imagen de la estructura atómica de la materia.

La capacidad de manipulación de la materia en esta escala abre nuevas posibilidades en el campo de la ciencia de los nuevos materiales y en la construcción de máquinas moleculares. Esta ciencia nace con una vocación eminentemente práctica: utilizar el conocimiento físico y químico de esta región de escalas para hacer cosas útiles.

En el área de la nanotecnología se diferencian dos tipos de *métodos de fabricación o enfoques*:

- **Top-down**, “*reducción del tamaño*”. Logra la miniaturización de estructuras a escala nanométrica. Es el tipo de nanotecnología más frecuente en la actualidad.
- **Bottom-up**, “*Auto ensamblado*”. Parte de una estructura nanométrica y comienza un proceso de montaje que crea un mecanismo mayor. Comúnmente, se conoce este auto ensamblado como *nanotecnología molecular*. Fue desarrollada por el investigador Eric Drexel.

Si bien, actualmente, el método de fabricación top-down permite la producción de gran variedad de microsistemas o micromáquinas, la mayoría de estos métodos de fabricación provienen de la industria microelectrónica. Se considera que la carrera en la miniaturización de los componentes empieza cuando en septiembre de 1958, Jack Kilby, que trabajaba para Texas Instruments, presentó el primer circuito integrado. Tenía el tamaño aproximado de la mitad de un clip e integraba en el mismo material semiconductor distintos elementos electrónicos. En el año 2000, Jack Kilby a los 76 años de edad recibió el premio Nobel de Física.

Desde entonces, la microelectrónica integra en los chips cada vez más transistores por unidad de superficie. Esto permite, en la actualidad, la gran capacidad de procesamiento que tienen las computadoras, particularmente, los sistemas portátiles. El Dr. en química Gordon Moore fue muy importante en esta revolución tecnológica hacia lo pequeño. Además de ser uno de los fundadores de Intel, es conocido por la ley que formuló en 1965. La ley de Moore dice que el número de transistores que pueden integrarse en un chip (en 1965) se duplicarán cada 18 meses. Antes de esa ley se consideraba que la duplicación ocurría cada 2 años. Algunos estudiosos del fenómeno, consideran que la Ley de Moore *jamás ha predicho con exactitud ningún desarrollo en el campo de la microelectrónica* y que se trata, en realidad, de un mito y una atribución sin sentido, dado que varios científicos de la época conocían también este crecimiento exponencial y predijeron con mayor exactitud los futuros niveles de integración. Más que como una ley, debería considerarla como una tendencia.

Pero independientemente de la justicia en la atribución o la exactitud de la afirmación original, lo cierto es que la famosa ley se ha convertido, durante estos últimos 40 años, en la impulsora de la industria informática, un objetivo autoimpuesto por los fabricantes como Intel o AMD a la hora de

desarrollar sus productos. Intel fabricó su primer procesador en 1971, seis años después de la publicación del artículo de Moore. Fue el modelo 4004. En su interior se apilaban 2.250 transistores.

En la actualidad, un solo chip tiene decenas de millones de transistores, y los microprocesadores con tecnologías multi-core, de más de 100 millones de transistores, son cada vez más comunes.

Ahora, sin embargo, científicos de la propia Intel pronostican que la barrera física, es decir la limitación impuesta por las características de la materia, será alcanzada a más tardar en el año 2021. A partir de entonces, el desarrollo de los chips no podrá continuar al ritmo acostumbrado. Los actuales procesadores están basados en una arquitectura de 130 nanómetros. Recientemente, Intel anunció los primeros prototipos de chips de 65 nanómetros, y se espera que en el 2018 se inicie la producción de chips de 16 nanómetros.

A juicio de los científicos de Intel, tal arquitectura representa el comienzo del fin de la Ley de Moore. Los chips de 16 nanómetros representan las proximidades de la frontera física de la compresión material que puede darse a un transistor porque esas dimensiones implicarían que los electrones superen los límites del transistor que, de esa forma, no podría ser controlado. En teoría, sería incluso posible construir un transistor de 1,5 nanómetros. Tales características aumentarían considerablemente el consumo energético del procesador y harían necesario usar un sistema de refrigeración de alta potencia.

Aquí aparecen las ventajas del bottom-up que permite ir construyendo de abajo hacia arriba átomo a átomo, molécula a molécula. La futura nano-electrónica llegará desarrollada con las técnicas del bottom-up. Así como las micromáquinas o microsistemas que se fabrican hoy en día son mucho más que microelectrónica, se prevén desarrollos de nano-máquinas mediante la utilización de las técnicas del bottom-up.

En la actualidad, ya existen algunos productos nanotecnológicos a nuestro alrededor, como raquetas de tenis más resistentes y ligeras gracias al empleo de nanotubos de carbono, cosméticos con nanopartículas que facilitan su absorción y recubrimientos que gracias a las nanopartículas impiden la deposición de suciedad.

### 12.1.2. Importancia de la Nanotecnología

La nanotecnología permite la creación de nuevos materiales, dispositivos y sistemas, útiles y funcionales, mediante el control de la materia en la escala del nanómetro, y el aprovechamiento de nuevos fenómenos y propiedades físicas, químicas y biológicas a esa escala de longitudes.

Es común decir que la nanociencia es una ciencia “horizontal” porque se puede considerar que influye en, prácticamente, todos los sectores. Con frecuencia, reúne distintas áreas científicas y se ve favorecida por enfoques interdisciplinarios o convergentes. Se espera que permita introducir innovaciones que den respuesta a muchos de los problemas que enfrenta la sociedad en la actualidad.

La fabricación a nanoescala exige un nuevo enfoque interdisciplinario tanto en la investigación como en los procesos de fabricación (ver figura 2).

Conceptualmente, se consideran dos vías de trabajo. La primera consiste en la miniaturización de los microsistemas, denominado *enfoque de arriba abajo o top-down*. La segunda, en imitar a

la naturaleza mediante el desarrollo de estructuras a partir de los niveles atómico y molecular, denominado *enfoque de abajo arriba* o *bottom-up*.

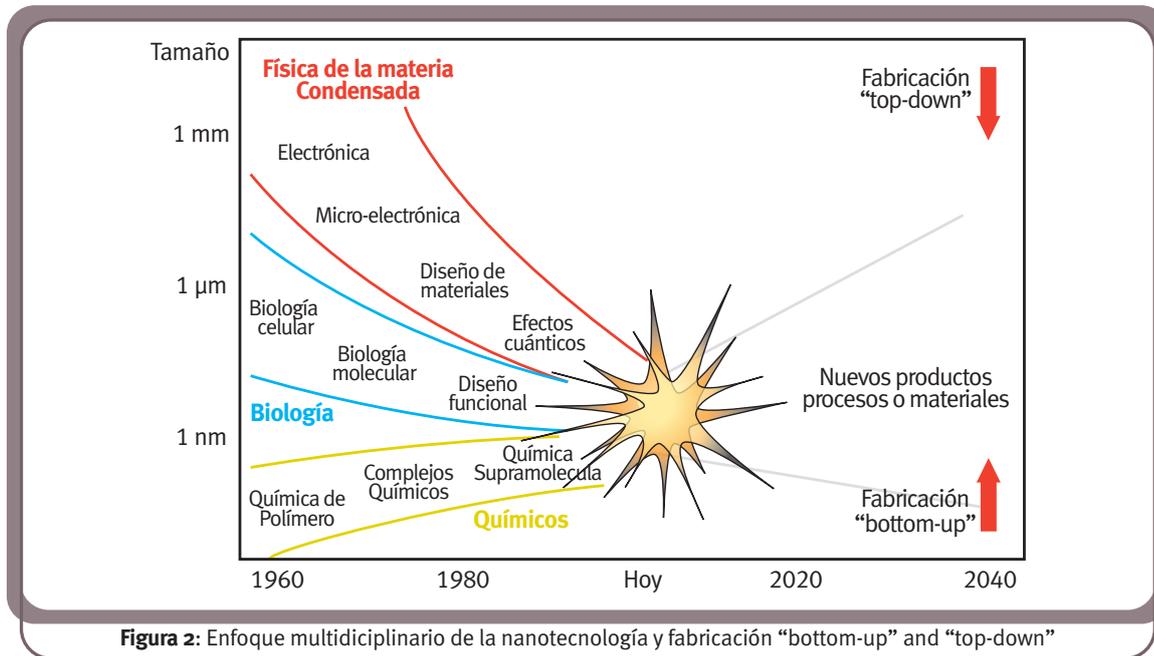


Figura 2: Enfoque multidisciplinario de la nanotecnología y fabricación “bottom-up” and “top-down”

En el caso de los dispositivos, se tiende a miniaturizar porque esto permite minimizar el uso de energía y materiales durante la manufactura. Además, se pueden tener sistemas redundantes y arreglos integrados con la electrónica, lo que permite simplificar los sistemas y reducir el consumo de potencia. También se tienen ventajas competitivas en relación al costo / beneficio funcional y, por último, resultan poco invasivos.

### 12.1.3. Aproximación a la Nanotecnología

La nanotecnología involucra a varias ramas de la ciencia por lo que es difícil de definir. *Podría decirse que es el diseño, fabricación y aplicación de nanoestructuras o nanomateriales y el conocimiento de las relaciones entre las propiedades o fenómenos físicos y las dimensiones del material.* Se refiere a materiales o estructuras en escala nanométrica, entre décimas y centenas de nanómetros ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ).

Es un nuevo campo o dominio científico debido a que los materiales o estructuras en escala nanométrica poseen propiedades físicas distintas del material micrométrico, o exhiben nuevos fenómenos físicos.

A través de la nanotecnología se imagina la posibilidad de acceder a nanoestructuras de fases metaestables con propiedades tales como superconductividad o magnetismo, o de crear instrumentos miniaturizados, como sensores biológicos que alerten de enfermedades en estadios tempranos, nanorobots que puedan reparar un daño interno y remover toxinas de nuestro organismo, o llevar a escala nanométrica sensores de toxinas en el ambiente.

En todo caso, la síntesis y procesamiento de nanomateriales es el punto esencial para el desarrollo de la nanotecnología. El estudio de nuevas propiedades físicas y aplicaciones de nanomateriales sólo es posible cuando estos materiales son sintetizados en las dimensiones, forma, estructura y composición química deseadas.

Esta escala de tamaños está bastante alejada de nuestra percepción sensorial.

Si pensamos en construir sensores pequeños, se requiere que cada uno de sus componentes sea lo más pequeño posible, lo que obliga a encontrar nuevos métodos de síntesis para la obtención de los compuestos deseados.

## 12.2. NANOSISTEMAS Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN

### 12.2.1. El dominio de lo nano

Por Horacio Troiani (CAB y CONICET)

Desde hace ya varios años los estudios en ciencia de materiales han sido revolucionados por la aparición de los *nanomateriales*. Cuando se fabrican materiales de dimensiones muy pequeñas, del orden del nanómetro (nm), se hacen evidentes propiedades muy interesantes en los mismos. Tratemos de hacernos una idea de lo que significa “1 nm” ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ).

Todos tenemos una idea aproximada de lo que significa 1 milímetro (mm) porque somos capaces de verlo en una regla común. Si dividimos la distancia de 1 mm por 1.000, tenemos 1 micrón. Si ahora dividimos este micrón por 1.000, tenemos 1nm.

Un transistor, cuyas dimensiones típicas esté en la escala del micrón, tendrá 1.012 átomos. Pero si lográramos construir un transistor en la escala del nm tendría sólo 1.000 átomos. Los materiales *nano* presentan una variedad importante de geometrías y, por ende, de aplicaciones.

El prefijo *nano* indica que por lo menos alguna de las dimensiones características del material está reducida a tamaños en la escala de los nm o menor. Encontramos en este ámbito nanopartículas, nanotubos, nanoalambres, etc.

### 12.2.2. El microscopio electrónico de transmisión (TEM)

La forma usual de “ver” objetos se basa en la interacción de la luz visible, que proviene de estos, con nuestros ojos. Pero esta no es la única forma. Podemos hacer interactuar electrones con la materia y reconstruir una imagen de la misma, basados en la interacción de estos electrones con el objeto bajo observación.

Los equipos que proveen este tipo de imágenes son los denominados *microscopios electrónicos*. Hay de varios tipos.

En un microscopio electrónico de transmisión, un haz de electrones atraviesa una muestra delgada. Pero como nuestros ojos no ven electrones, hacemos que estos incidan sobre una pantalla de fósforo, que emite luz y nos permite recrear una imagen del sistema bajo estudio.

Hoy en día, la mejor resolución posible es la de un microscopio electrónico de transmisión. Permite resolver y armar imágenes de átomos.

Además, un microscopio electrónico de transmisión es una herramienta muy versátil. Usualmente, en un TEM moderno se acoplan otras técnicas posibles que permiten conocer propiedades como la composición química de un material, propiedades electrónicas etc.

### • Algunos ejemplos

Las propiedades de los materiales nano son distintas de las propiedades de los materiales de tamaños usuales. Para entender que las propiedades se ven tan drásticamente modificadas debemos analizar los tamaños implicados.

Pongamos el caso del cobre. La distancia entre planos atómicos en un cristal de Cu puro es 0.25 nm. Esto indica que si el nanomaterial bajo estudio tiene, a lo largo de una dimensión, algunos nm o decenas de nm, este material tendrá un número muy reducido de planos cristalinos o átomos. Este hecho automáticamente genera un material donde una gran proporción de los átomos estará en la superficie. En un sólido, los átomos superficiales tienen propiedades diferentes a los del interior, lo que se conoce como *bulk*. Esto indica que la proporción de átomos con propiedades diferentes para el caso de los nanomateriales es mucho mayor que para el caso convencional. En consecuencia, los materiales *nano* tendrán propiedades que se apartarán notablemente de los materiales masivos convencionales.

Las *nanoestructuras de carbono* merecen una atención especial porque los átomos de carbono tienen una gran variedad de posibilidades de generar distintos tipos de enlaces químicos, produciendo toda una diversidad de variantes en cuanto a nanoestructuras de carbono se refiere. Como ejemplo interesante, podemos nombrar a los *fullerenos*, también llamados *buckyballs*. Un fullereno es una molécula vacía de átomos de carbono.

Los átomos en la pared del fullereno están ordenados en anillos de 5 y 6 átomos formando hexágonos y pentágonos, como en una pelota de fútbol. Un fullereno es básicamente un plano de *grafeno* (átomos de carbono formando una estructura plana de hexágonos en forma de panal de abejas) cerrado sobre sí mismo con pentágonos agregados para que pueda tener la curvatura adecuada. La figura 3 muestra la imagen de un fullereno de pared múltiple obtenida con un microscopio electrónico de transmisión.

Los *nanotubos de carbono* son otro ejemplo muy interesante. Si en lugar de cerrar al plano de grafeno esféricamente lo enrollamos de manera de formar un cilindro, tenemos un nanotubo de carbono. Como los nanotubos de carbono pueden formarse arrollando los planos de diferentes maneras, vemos toda una variedad o familia de estructuras posibles. Hay nanotubos cuya pared está formada solamente por un plano de átomos de grafeno, es decir *nanotubos de pared simple* (en inglés: *single wall carbon nanotubes SWCNT's*) o alternativamente por algún número de planos mayor que uno, en cuyo caso hablamos

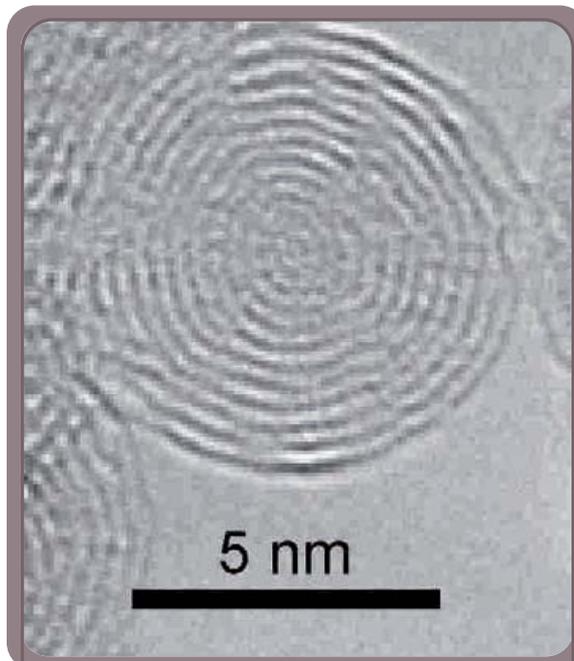
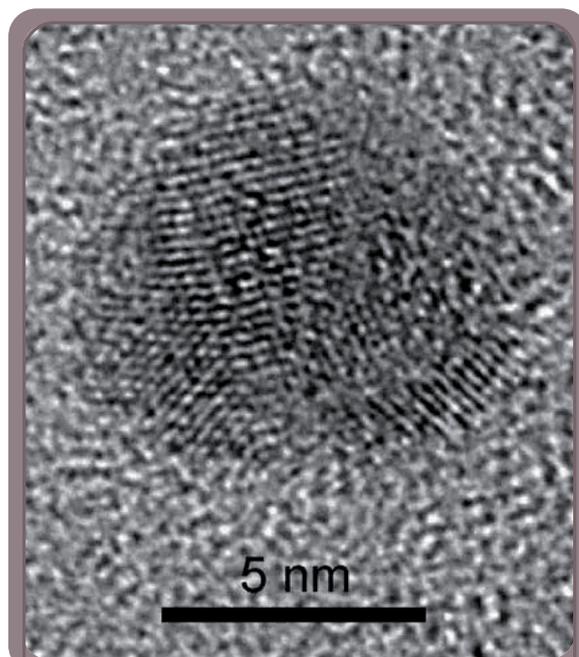


Figura 3: Imagen de un fullereno multiwall en el TEM

de *nanotubos de pared múltiple* (en inglés: multi wall carbon nanotubes *MWCNT's*). De los nanotubos de carbono interesan dos cosas: sus propiedades electrónicas y mecánicas.

Desde el punto de vista electrónico resultan muy interesantes porque variando el tipo de arrollamiento con el que se forma el SWCNT, se obtienen materiales que van desde conductores a aisladores. Desde el punto de vista mecánico, los nanotubos de carbono son materiales muy livianos y, al mismo tiempo, muy resistentes. Es decir con muy alto módulo de Young, lo que los convierte en materiales muy interesantes a la hora de fabricar materiales compuestos. En el artículo donde, por primera vez, se presentó a los nanotubos de carbono los mostraba en una imagen obtenida en el microscopio electrónico de transmisión.

Otro ejemplo muy interesante es la observación de nanopartículas en un TEM. Puede determinarse por ejemplo su tamaño, geometría, cristalinidad, química etc. En la figura 4 vemos una nanopartícula de plata (Ag) donde tenemos resolución atómica.



**Figura 4:** Imagen de una nanopartícula de plata proveniente de un TEM. Los puntos blancos son los átomos del material.

### 12.2.3. ¿Cómo se obtienen materiales de tamaño de nanómetros?

Existen algunos elementos y compuestos químicos que, en ciertas circunstancias, se obtienen fácilmente en tamaños nanoscópicos como, por ejemplo: los nanotubos de carbono.

Sin embargo, para otros casos es necesario emplear métodos de síntesis en los que se confina el material en un molde. Tal como haríamos con un budín en que la misma mezcla de ingredientes la podemos colocar en un recipiente grande y luego cortar porciones o ponerlo en moldes de tamaño pequeño que permiten obtener porciones individuales, en el caso de la síntesis química se pueden usar moldes tan pequeños que no podríamos verlos si no es con el auxilio de un microscopio electrónico que permite aumentar el tamaño de los objetos en 100.000 veces.

El material sintetizado en moldes toma la forma del mismo. Entonces, si usamos moldes de tipo cilíndrico obtendremos hilos o tubos de forma cilíndrica.

#### 12.2.3.1. ¿Cuáles pueden ser esos moldes?

Los poros de una esponja, los poros creados en un material sólido, algo así como un colador de fideos pero con poros de tamaño extremadamente pequeños. Por ejemplo: se pueden usar los poros creados en una membrana plástica, que actúan como filtros de exclusión, es decir que sólo dejan pasar elementos más pequeños que el tamaño del poro y permiten que ciertas soluciones queden atrapadas dentro del poro. Luego por efecto de tratamientos térmicos se consigue el compuesto deseado dentro de los poros.

### 12.2.3.2. ¿Cómo se obtienen esos moldes?

Sabemos que cuando un proyectil impacta sobre un material, hace un daño. Por ejemplo, cuando una bala impacta en una chapa metálica de un auto deja un agujero. Si en lugar de una chapa, impacta sobre un material blindado, deja una marca porque este material es de mayor dureza.

En nanotecnología necesitamos poros muy pequeños, por lo tanto el proyectil debe ser pequeño: átomos cargados eléctricamente. Los poros se generan en una membrana de policarbonato, el mismo material del que se hacen los viveros o algunas ventanas, de espesor muy pequeño (la centésima parte de 1 milímetro).

Este proceso que se lleva a cabo en instalaciones especiales. En ellas se consiguen átomos a los que se les quitan electrones, o sea quedan con carga positiva, y a los que se los acelera poniéndolos en un campo eléctrico tal que sean atraídos hacia el terminal negativo adquiriendo alta velocidad. En medio de su camino se coloca la membrana plástica, los átomos cargados y acelerados la atraviesan produciendo una huella en el material de geometría cilíndrica. El material en la zona del impacto quedó dañado y el daño se observa en todo el camino que atravesó el proyectil (los átomos). Con tratamientos químicos adecuados, se puede disolver esa parte del material y obtener un material poroso: el molde. El tamaño de los poros dependerá del tipo de proyectil y de cómo fue hecho el tratamiento de disolución.

### 12.2.3.3. ¿Por qué esos poros sirven como moldes?

El material plástico que se usa es hidrofóbico.

Cuando lavamos manzanas que compramos en la verdulería vemos que en su superficie se forman gotas y no una película de agua continua. Esto sucede porque las manzanas están enceradas para que tengan mejor apariencia. Con el plástico para los moldes sucede lo mismo, pero debido a su composición química (es como si estuvieran enceradas). Pero en la zona donde se formaron los poros, el comportamiento del material respecto al contacto con el agua es muy distinto. En los poros, el agua se pega a las paredes y, por lo tanto, obtenemos pequeñísimos recipientes donde colocar reactivos químicos para sintetizar materiales.

Tal como cuando usamos un sorbete y vemos que cuando lo sacamos del vaso queda un parte llena de líquido (y esa altura de líquido depende del diámetro del sorbete), podemos sumergir la película porosa en una solución, y los poros contendrán solución. Pero si queremos que los poros queden totalmente llenos podemos usar esta membrana como si fuera un filtro y llenamos totalmente el volumen del poro, haciendo pasar la solución a través del mismo.

### 12.2.3.4. ¿Cómo procede la reacción química dentro del poro?

Hasta el momento, tenemos poros de un material plástico llenos de solución.

En nuestra vida cotidiana, sabemos que en un horno de microondas podemos calentar o cocinar alimentos. Debemos utilizar contenedores adecuados para poner los ingredientes. Un contenedor que no se altere por la irradiación de microondas, usualmente: recipientes plásticos.

El material poroso que usamos como molde en nanotecnología es plástico, entonces podemos

usarlo como recipiente para hacer reacciones químicas. Sabemos que el agua de la solución se va a calentar, tal como el café de la mañana, y hasta se puede evaporar totalmente dejando en las paredes de los poros reactivos químicos sólidos que estaban disueltos en la solución de partida (como cuando nos olvidamos una taza de café sin lavar, y a la mañana siguiente vemos un residuo oscuro sobre el fondo y las paredes de la taza).

En este paso tenemos reactivos sólidos dentro de los poros del material plástico. Si queremos que sólo quede el compuesto que buscábamos, debemos hacer desaparecer el molde.

#### **12.2.3.5. ¿Cómo nos quitamos el molde de encima?**

Es muy sencillo, todos sabemos que los plásticos son combustibles que se queman eliminando productos gaseosos (en algunos casos tóxicos). El policarbonato que usamos se quema produciendo sólo vapor de agua y dióxido de carbono y no deja ningún residuo sólido. Por lo tanto, podemos poner la membrana porosa que tratamos en un horno a una temperatura superior a 600 °C y conseguiremos que queden los *nanotubos o nanohilos* del compuesto que buscábamos.

#### **12.2.3.6. ¿Para que servirían estos materiales de tamaño nanométrico?**

En ciertos procesos, como por ejemplo en el caso de los catalizadores que tienen en el caño de escape los autos de nueva generación para mejorar la calidad del aire que eliminan, es necesario que el material que interviene en la reacción tenga un tamaño de partícula muy chico para que con la misma masa de material se obtenga un área expuesta a la reacción química mucho más grande.

Imaginemos un trozo de hierro que por efecto del aire húmedo se transforma en óxido, cosa que vemos frecuentemente cuando no protegemos con pintura la superficie de un marco de ventana o una puerta de hierro. Si es un trozo grande, la superficie en contacto con el aire es mucho menor que si lo cortamos en pequeños trozos. En cuanto más pequeños sean los trozos, más rápido se convertirá todo en óxido de hierro.

Aceleramos reacciones si la superficie en contacto es mayor. Esto es muy útil en casos de catálisis o si usamos sensores en los que nuestro material reacciona con algún elemento tóxico del ambiente y, como consecuencia, genera una señal eléctrica que podemos medir y cuantificar.

Podemos decir que con materiales nanoestructurados mejoramos la eficiencia de ciertos sistemas y, además, posibilitamos su miniaturización.

### **12.3. APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA**

La nanotecnología tiene múltiples aplicaciones en otras ciencias y tecnologías.

#### **12.3.1. Ciencia de los materiales**

El impacto de la utilización de nanotecnologías se sentirá en casi todos los sectores de las ciencias de los materiales. Las nanopartículas ya se emplean para reforzar materiales o dar nuevas funciones a los cosméticos. Se utilizan superficies nanoestructuradas para hacerlas resistentes al rayado, hidrófugas, autolimpiantes o estériles. El injerto selectivo de moléculas orgánicas a

través de la nanoestructuración superficial permitirá avanzar en la fabricación de biosensores y de dispositivos electrónicos moleculares. Se puede mejorar enormemente el rendimiento de los materiales en condiciones extremas, en particular en los sectores espacial y aeronáutico.

### **12.3.2. Medicina**

Con las micro y nanotecnologías se podrán obtener sistemas de diagnóstico miniaturizados que podrían implantarse y utilizarse en la detección precoz de enfermedades. Se están desarrollando nuevos recubrimientos nanotecnológicos que pueden mejorar la biocompatibilidad de los implantes. Asimismo, está en desarrollo una nueva generación de materiales en el ámbito de la ingeniería de tejidos y de materiales biomiméticos que abre la posibilidad, a largo plazo, de conseguir la síntesis de órganos de sustitución. Se están desarrollando nuevos sistemas de suministro dirigido de drogas medicinales. Otro estudio importante es acerca de la posibilidad de llevar nanopartículas al interior de células cancerosas para su tratamiento, mediante la utilización de calor.

### **12.3.3. Fabricación de instrumentos para el estudio de las propiedades de la materia a una escala nanométrica**

La invención del microscopio de efecto túnel marcó un hito en el nacimiento de la nanotecnología. La nueva instrumentación desempeña un papel clave en el desarrollo de procesos de fabricación.

### **12.3.4. Producción y almacenamiento de energía**

Se trata de nuevos desarrollos en celdas de combustible o sólidos ligeros nanoestructurados que tienen el potencial para almacenar eficazmente hidrógeno. Se están desarrollando nuevas celdas solares fotovoltaicas de mayor eficiencia y de menor costo. Gracias a los avances en mejorar los aislamientos, el transporte e iluminación la nanotecnología será posible un fuerte ahorro de energía.

### **12.3.5. Tecnologías de la información**

En éste área se estudian sistemas de almacenamiento de datos de muy alta densidad de registro y nuevas tecnologías de visualización a base de plásticos flexibles. En el largo plazo, el desarrollo de la nanoelectrónica molecular, la espintrónica y la informática cuántica abrirán nuevos horizontes a la tecnología informática.

### **12.3.6. Industria alimenticia**

El agua y el medio ambiente se beneficiarán con las nanotecnologías, con el desarrollo de instrumentos para detectar y neutralizar la presencia de microorganismos o plaguicidas. Mediante nuevas técnicas de nanoetiquetado miniaturizado podría realizarse el seguimiento desde el origen de los alimentos. El desarrollo de métodos de recuperación de efluentes líquidos basados en el uso de nanotecnologías permitirá limpiarlos de contaminación.

### **12.3.7. Seguridad**

Se desarrollarán nuevos sistemas de detección de olfato electrónico (sniffers) de alta especificidad de alerta precoz ante agentes químicos o biológicos, sensibles hasta el nivel molecular. El nanoetiquetado de los billetes de banco podría contribuir a la protección de la propiedad.

En la actualidad ya se están comercializando productos desarrollados utilizando las nanotecnologías. Se trata de productos médicos (vendajes, válvulas cardíacas, etc.), componentes electrónicos, pintura resistente al rallado, equipos deportivos, telas antiarrugas y antimanchas y lociones solares.

Algunos analistas de mercado y la National Science Foundation (EE.UU.) opinan que el mercado global de nanotecnología ascenderá a 1.500 billones de dólares en 2015, excluyendo los semiconductores y 2.950 billones de dólares<sup>1</sup> incluyéndolos.

En un vasto campo de las aplicaciones y en el camino a la miniaturización hacia los “nanodispositivos” se encuentran los llamados dispositivos o sistemas MicroElectroMecánicos (MEMS acrónimo originado en EE.UU.). En Europa se habla de MicroSistemas y en Japón de Micromáquinas. Estos microsistemas permiten hacer de interfaz entre la estructura nano y la electrónica de control.

Estos dispositivos MEMS permiten, en muchos casos, la integración de la interfaz macro-micro-nano para aplicaciones en dispositivos sensores y actuadores. Estos dispositivos o sistemas tienen la habilidad de sensor, controlar y accionar en la escala micro, generando efectos en la escala macro.

## 12.4. INVESTIGACIÓN E IMPACTO DE LA MICRO Y LA NANOTECNOLOGÍA EN LA ARGENTINA

A partir de aquí mostramos las experiencias en nanotecnología que están llevando en Argentina. Científicos argentinos relatan y explican los conceptos e investigaciones que están llevando a cabo.

### 12.4.1. El plan espacial argentino.

Por: Maximiliano Fischer, MSc. AAE, Ingeniero Aeroespacial, Grupo MEMS – CNEA.

*“En los próximos años, habrá numerosas demostraciones de Micro-dispositivos y micro-estructuras en aplicaciones espaciales. El avance de los desarrollos en MEMS tiende a parecerse más a la expansión de Internet que al crecimiento funcional de los microcircuitos cuantificado por la Ley de Moore. Se irán introduciendo dispositivos especialmente creados para cada nueva aplicación y se irán poniendo en órbita.”*

#### 12.4.1.1. Introducción

Indudablemente, estamos viviendo una era en la que la tecnología y la innovación son factores clave para el progreso. En particular, Argentina está despertando tecnológicamente, luego de algún reposo desafortunado, con ideas más claras, con cierta falta de experiencia, pero consciente de que su crecimiento como Nación exige el esfuerzo de recuperar la capacidad de innovar. La innovación tecnológica es una herramienta de desarrollo si cumple con, al menos uno, de dos objetivos: resolver problemas locales para los que no existen soluciones extranjeras, o bien borrar fuertes ataduras a la creciente dependencia tecnológica a través de la ingeniería y fabricación de productos de uso masivo en el mercado interno.

A nivel mundial, en estados tecnológicamente líderes, se habla de tecnologías “disruptivas” y se elaboran análisis de brechas entre poderíos económicos de países desarrollados y de países en vías de desarrollo. Justamente, *la Nanotecnología es considerada una tecnología disruptiva,*

<sup>1</sup> En “MEMS and Microstructures in Aerospace Applications”. Editores: Robert Osiander, M. Ann Garrison Darrin, y John L. Champion, © 2006 por Taylor & Francis Group, LLC.

es decir, que tiene un inmensurable poder de revolucionar el presente, ya sea objetos, soluciones, modos de trabajar y hasta de comportamiento. Según estudios muy recientes y alarmantes, la brecha entre países ricos y pobres aumentará por causa de dichas tecnologías disruptivas. Por ejemplo, para hacer Nanotecnología se necesitan inversiones en Educación, Ciencia, Tecnología, Investigación y creación de empresas. Los países que decidan no transitar este camino estarán obligados a una dependencia económica cada vez mayor, puesto que deberán comprar productos *Nano* como medicinas, sensores, materiales, baterías, etc., que irrumpirán en el mercado por sus incomparables ventajas. Algo así como lo que hoy ocurre en Argentina con los teléfonos móviles.

Una tecnología de punta en la que afortunadamente nuestro país ha tenido una sostenida claridad a lo largo de décadas es la espacial. Según las palabras del Dr. Conrado Varotto, Director Ejecutivo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), “Argentina es un país espacial”. Hace uso intensivo de los productos de la ciencia y la tecnología espaciales para sus actividades cotidianas: imágenes desde el espacio, estudios de suelos por radares en satélites, estudios meteorológicos, etc. La CONAE tiene por objeto el cumplimiento del Plan Espacial Nacional (actualmente en vigencia hasta 2015) que ha tenido éxitos muy visibles como las misiones satelitales operativas, y otros no tan visibles como el impulso de nuevas capacidades tecnológicas en centros de investigación, universidades y empresas.

La Nanotecnología puede ser una de estas capacidades. De hecho, si bien el mundo no ha comenzado a aprovechar más que ínfimamente las ventajas que los sistemas “nano” tienen para aportar a los sistemas espaciales –y la Argentina no es excepción –, existe un interés cada vez mayor de integrar Nanotecnología en satélites, cohetes y sistemas terrestres. En general, los dispositivos que incorporan Nanotecnología poseen cualidades como: bajísimo consumo de energía, masa y tamaño insignificantes, robustez y/o propiedades o funciones nunca antes logradas artificialmente. Estas cualidades los hacen muy convenientes para el espacio, por los altos costos de envíos de cargas al espacio, por la confiabilidad necesaria para satélites debido a la inviabilidad de reparaciones, o bien por la vida de la astronave en lo que concierne a la batería o la planta de energía.

El motivo de que en la comunidad espacial haya un marcado interés en el desarrollo de sistemas Nano y Micro pero que no haya muchas misiones que realmente los incluyan es, nada menos, que el estudio de la confiabilidad. Se necesita recorrer un largo camino de estudios, ensayos y rediseños hasta poder asegurar que un componente nuevo es realmente confiable. Deberá soportar condiciones extremas como variaciones importantes de temperatura, vacío, disipación térmica casi nula, vibraciones (en el despegue sobre todo), radiación cósmica (partículas, iones, protones), campos electromagnéticos, operación continua, etc. La naturaleza de los dispositivos nano o micro, además, dista de ser estándar como una PC o el transistor de silicio. Por el contrario, se crea un dispositivo diferente para cada aplicación, por lo que cada vez que se incluye un sistema micro o nano en un satélite o cohete se deben hacer las pruebas de confiabilidad casi desde cero y especiales para el mismo.

Los procesos de verificación y calificación son rigurosos, y no sólo son ensayos al final de la fabricación. Consisten en un conjunto planeado de tareas que comprueban que desde el diseño, los procesos de manufactura y el dispositivo final cumplen con requerimientos de la misión y, en la mayoría de las veces, no hay normas disponibles. Los trabajos para estandarizar procedimientos han comenzado recién en los últimos tres o cuatro años.

Queda claro que las razones por las que no hemos visto grandes cambios en el uso de Nanotecnología en sistemas espaciales a nivel mundial nada tiene que ver con restricciones tecnológicas. Con adecuada planificación, un país como el nuestro tiene la oportunidad seria de insertar productos de alta tecnología en mercados mundiales en muy poco tiempo, haciendo buen uso de su experiencia previa, su alto nivel científico y su momento propicio.

#### **12.4.1.2. Mems, Nems y Nano en el espacio**

Tanto los sistemas microelectromecánicos (MEMS), los nanoelectromecánicos (NEMS) y los que combinan características innovadoras procedentes del uso de Nanotecnología como recubrimientos, materiales nanoestructurados, etc., aportarán un sinnúmero de posibilidades y ventajas a los sistemas de vuelo y los GSS (Ground Support Systems o sistemas de soporte en Tierra).

Pero hará falta entender dos diferencias clave entre los MEMS del mercado usual y los de las misiones espaciales. En primer lugar, el mercado espacial será de varios órdenes de magnitud inferior; y en segundo lugar, va a ser inminente la necesidad de comprobar la confiabilidad de los nuevos dispositivos y materiales. Los modelos, simulaciones, ensayos de vuelo, ensayos en Tierra, documentación de calificación, etc., van a ser cada vez más comunes entre los equipos de trabajo en MEMS y los Nanotecnólogos que deseen que sus desarrollos se incluyan en misiones espaciales.

Uno de los puntos críticos en la *especialización* o adecuación para volar en satélites, junto con resistencia a vibraciones, golpes, degradación, resistencia a campos electromagnéticos y otros fenómenos a los que estará sometido un sistema Nano o un MEMS, es su tolerancia a un ambiente con alta radiación. Precisamente para este punto, nuestro país cuenta con capacidades sólidas e infraestructura fundamental que deben aprovecharse. El momento es propicio, puesto que este es uno de los elementos que requerirían más tiempo e inversión para el país, y porque la comunidad espacial del mundo recién se encuentra en la parte naciente de la aplicación de MEMS en misiones, y los productos nanotecnológicos pueden estar aún más lejos del lanzamiento.

Más allá de las tareas que tenemos por delante concernientes a la especialización de MEMS, NEMS y materiales Nano, hoy sabemos que éstas son tecnologías que seguramente van a mejorar en unos casos, y a hacer posible en otros, las futuras misiones científicas y de exploración.

Veamos dos ejemplos que ilustran esta importancia.

#### **12.4.1.3. Interfase Térmica Basada en Nanotubos de Carbono**

En agosto de 2008 la NASA envió la cuarta misión de servicios técnicos al Telescopio Espacial Hubble (HST)<sup>2</sup>.

La misma instaló nuevos instrumentos de alta potencia, que generaron una carga de calor importante y difícil de disipar en el espacio donde la falta de aire impide ventilar. El enfriamiento se hizo mediante una bomba de calor que transportó el calor mediante capilares hacia un radiador que irradia el calor al espacio exterior. Justamente, el desafío de lograr una conexión térmica eficiente entre ambos constituyó una oportunidad única para el uso de nanotubos de carbono, porque son los únicos materiales capaces de soportar semejante transferencia de calor en un ambiente de alto vacío y radiación y, aún así, proporcionar aislamiento eléctrico, poseer resistencia mecánica a la abrasión (requerida para su instalación por parte de los astronautas) y evitar la

<sup>2</sup> <http://sm4.gsfc.nasa.gov/overview/intro.php>

contaminación del telescopio o sus instrumentos. Los polímeros poseían la flexibilidad necesaria, pero no eran buenos aislantes o contaminaban los instrumentos ópticos al despedir vapores en el vacío. El elemento de interfase fue una especie de cepillo de unos 40 cm<sup>2</sup> con una placa de cobre atrás, y unos cuarenta millones de nanotubos de 40 nm de largo alineados como cerdas.

#### **12.4.1.4. Interruptor MEMS de Radiofrecuencia**

El Rockwell Science Center (RSC) fue el primer organismo en volar un dispositivo MEMS tan prometedor como el RFMS (Interruptor MEMS de RF). Si bien en el presente existen varios desarrolladores de esta tecnología, entre los que se encuentra la Argentina, los fabricados por RSC volaron exitosamente en las dos misiones PICOSAT, cuyo objetivo era demostrar que los MEMS están listos para integrar misiones espaciales. Entre sus numerosas ventajas se encuentran su inherente robustez y tolerancia a la radiación, su pequeña masa y consumo de energía y su alto aislamiento en circuito abierto. Además, no poseen ciertas limitaciones de los interruptores convencionales, basados en transistores de efecto de campo. Pero la característica más increíble es la capacidad de transmitir señales con pérdidas de cerca del 1% frente a un FET o un diodo PIN, con más del 40%. Todas estas ventajas los convierten en candidatos extraordinarios para futuras comunicaciones satelitales.

La CONAE y la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica) inclinaron hace pocos años sus intereses hacia los Switches MEMS de RF. Con socios como INTI, IAR, UTN-FRH y un laboratorio de fabricación italiano, el FBK-IRST, preparan el primer circuito avanzado de RF para una misión satelital. Con fondos del Gobierno Nacional, la SeCyT, CNEA, CONAE, y de la Provincia italiana de Trento, ya se han desarrollado exitosamente en el país los primeros interruptores MEMS. El sistema completo estará listo en tres años, aproximadamente, y permitirá reemplazar una antena convencional en el satélite o en Tierra por otra con tecnología MEMS hecha en el país.

Su cualidad distintiva es que se trata de una placa formada por un conjunto de antenas pequeñas que irradian independientemente, lo que se conoce como antena array. Manejando los desfases de señales se puede mover el lóbulo de irradiación o de detección sin mover ningún sistema mecánico. De este modo, la antena está siempre fija al cuerpo del satélite, y solo se mueve el rayo de comunicación con Tierra a medida que pasa de horizonte a horizonte. Esto ahorra peso en órbita al suprimir el motor o servo que mueve la antena, su consumo de la batería y, sobre todo, evita el consumo de combustible líquido para estabilizar y posicionar el satélite cada vez que se mueve la antena. La tecnología estaba en desuso por las altas pérdidas de su electrónica de RF. Los MEMS harán no solo que estos sistemas sean posibles, sino también que sean confiables, robustos y eficientes.

#### **12.4.1.5. ¿Cuál es el sentido de desarrollar este componente en Argentina?**

En primer lugar, las colaboraciones entre instituciones potencian capacidades y propician el fortalecimiento y la formación de recursos humanos altamente capacitados. En segundo lugar, permite incluir en nuestras misiones sistemas que no están disponibles en el mercado debido a restricciones políticas o de innovación. Una tercera razón es que dichas antenas todavía no se han hecho, o no han volado, o bien no lo sabemos.

### 12.4.1.6. Más Allá o en el Resto del Mundo

En su declaración de posición frente a la Nanotecnología, la Sociedad Espacial Nacional (USA) declara públicamente que la Nanotecnología Molecular, es decir, construcción de sistemas a partir de la manipulación de moléculas, impulsará la exploración y los asentamientos en el espacio. Agrega, además, que el camino llamado de abajo hacia arriba posee el potencial para aportar herramientas espaciales con mejoras colosales en desempeño y confiabilidad a costos relativamente bajos. El impacto de sistemas auto-replicantes fue reconocido por la NASA y el ISS (Instituto de Estudios Espaciales). A medida que se va llegando a la capacidad de controlar la materia a nivel atómico, el desarrollo espacial se irá convirtiendo en uno de los principales beneficiarios.

Algunas contribuciones que la Nanotecnología hará a los sistemas espaciales de exploración y científicos son: Funcionalidad química, películas delgadas (Nanolayers), aplicaciones de nanoestructuras a Optoelectrónica, tratamientos de superficies ultraprecisos y nanoanálisis.

Otra aplicación prometedora reconocida por la NASA, según la revista alemana Nanowerk Spotlight, es la protección de seres humanos y sistemas complejos a la radiación de los ambientes de futura exploración. Los BNT o nanotubos de boro, de igual estructura que los conocidos CNT de carbono, pero más estables químicamente y resistentes a la corrosión a altas temperaturas, ya están arrojando resultados asombrosos en pruebas de radiación.

Desde complejas formaciones moleculares auto-ensamblables hasta micro y nano dispositivos con partes móviles de masa insignificante, se vislumbran grandes cambios tecnológicos con aportes significativos.

Si bien el actual Plan Espacial Nacional argentino se centra sólo en satélites de aplicaciones científicas, el país tiene la capacidad de tomar estos ejemplos como impulsores para la coordinación necesaria entre centros educativos, de investigación y desarrollo, ministerios y el sector productivo que llevará a Argentina a un eficiente aprovechamiento de sus verdaderos logros y virtudes. De esto depende que en el futuro observemos nuestros pasos y pensemos “el esfuerzo valió la pena”.



#### Un dato curioso - Nano Trek

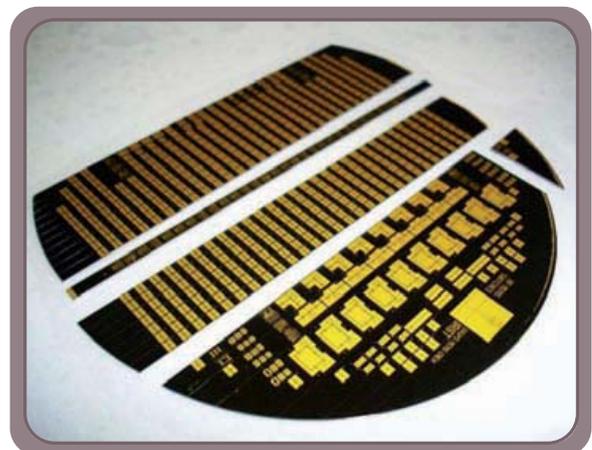
La nave espacial “Enterprise NCC-1701D” de Star Trek (Viaje a las Estrellas) fue fabricada en escala uno en mil millones, mediante CVD con un haz de iones Ga+ focalizado, de 30 kV.

**Longitud:** 8.8 μm.

**Magnificación:** 5000X.

**Instrumento:** Seiko Instruments, Inc. SMI9200.

**Autores:** Takayuki Hoshino y Shinji Matsui, Himeji Institute of Technology



## 12.4.2. Espectroscopía óptica de nanoestructuras

Por Alejandro Fainstein (Físico del Laboratorio de Propiedades Ópticas – CAB)

El Laboratorio de propiedades ópticas trabaja sobre dos líneas de interés en cuanto a la Nanociencia y la Nanotecnología. El Dr. Alejandro Fainstein las describe a continuación.

### 12.4.2.1. Manipulación de luz y sonido en la nanoescala

En el mundo de hoy, la tecnología de semiconductores es la base de la electrónica y la optoelectrónica y, por lo tanto, de la inmensa cantidad de productos y comunicaciones que caracterizan la sociedad humana del Siglo XXI. Con estos materiales se manipula o se intenta controlar la luz, la carga eléctrica, el sonido, la propagación de calor, dando lugar a fenómenos fundamentales novedosos y a aplicaciones extremadamente variadas. Productos tan cotidianos como la computadora, el láser, o internet están basados en estos desarrollos e ideas. Algunos de los desafíos consisten en hacer dispositivos cada vez más pequeños, más rápidos, y con propiedades diferentes, hasta hoy, no imaginadas.

Las preguntas que motivan nuestra línea específica de investigación son:

- ¿Podemos confinar la luz en el espacio, de tal manera de que sea “atrapada” durante un cierto tiempo en la nanoescala?
- ¿Cómo modifica esto la manera en que los fotones (los cuantos de luz) interactúan con la materia que constituye esas nanoestructuras?
- ¿Podemos usar estas mismas ideas para confinar hipersonido, un “ruido” en la nanoescala?
- ¿Qué pasa cuando confinamos y amplificamos al mismo tiempo la luz y este hipersonido?
- ¿Podrán estas estructuras ayudarnos a fabricar un “laser de sonido”, es decir, un dispositivo que emite sonido coherente (en lugar de luz coherente, como es el caso de los láseres que conocemos) de un único tono, de gran direccionalidad y de altísima frecuencia y longitud de onda de algunos nanómetros?
- ¿Para qué podrá servirnos esto en la vida cotidiana?

En nuestro grupo en Bariloche, y en colaboración con grupos principalmente de Francia, se desarrollan y estudian nanoestructuras concebidas para responder estas preguntas.

Las técnicas de crecimiento son del mundo *nano*, y consisten en una deposición súper controlada de capas de átomos, formando arreglos perfectamente periódicos que no existen en la naturaleza, salvo por creación del hombre. Las propiedades de estas nanoestructuras responden a un diseño preconcebido y dan lugar a fenómenos novedosos de confinamiento de la luz y del hipersonido, y de una amplificación de la interacción entre estos.

Los experimentos se desarrollan y estudian en el dominio espectral (determinando qué *colores de luz*, y qué *tonos de hipersonido* confinamos y amplificamos) y en el dominio temporal (generando estas vibraciones, y viendo cómo evolucionan en el tiempo). Ambos tipos de experimentos, basados en técnicas ópticas con láseres, están en la frontera del conocimiento internacional.

Hacemos investigación fundamental, pero no dejamos de tener en mente que nuestro trabajo puede servir, por ejemplo, para hacer tomografías con resolución nanométrica en materiales opacos a la luz, o para modular la luz y la carga con frecuencias de THz, (Terahertz=un millón de millo-

nes de veces por segundo), es decir 1.000 veces más rápido que las tecnologías más veloces que hoy están incorporadas en nuestras computadoras (Gigahertz=mil millones de veces por segundo).

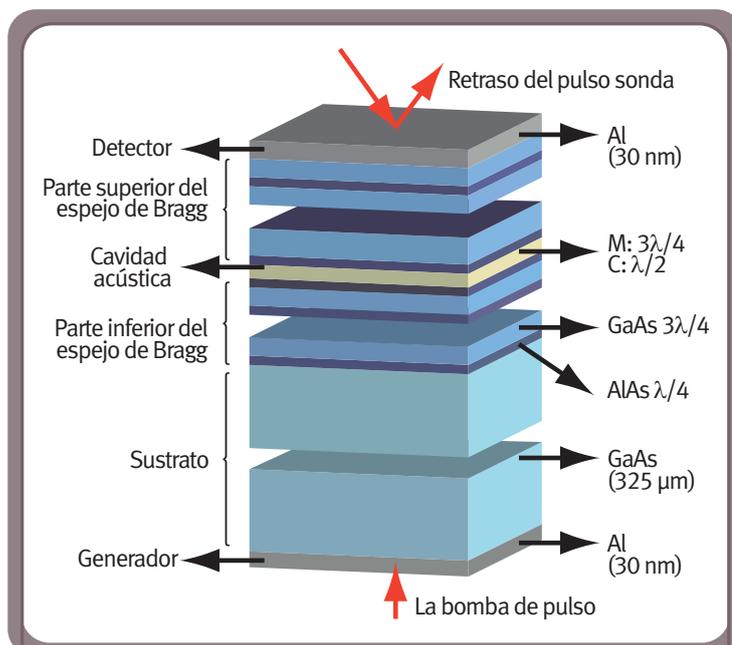
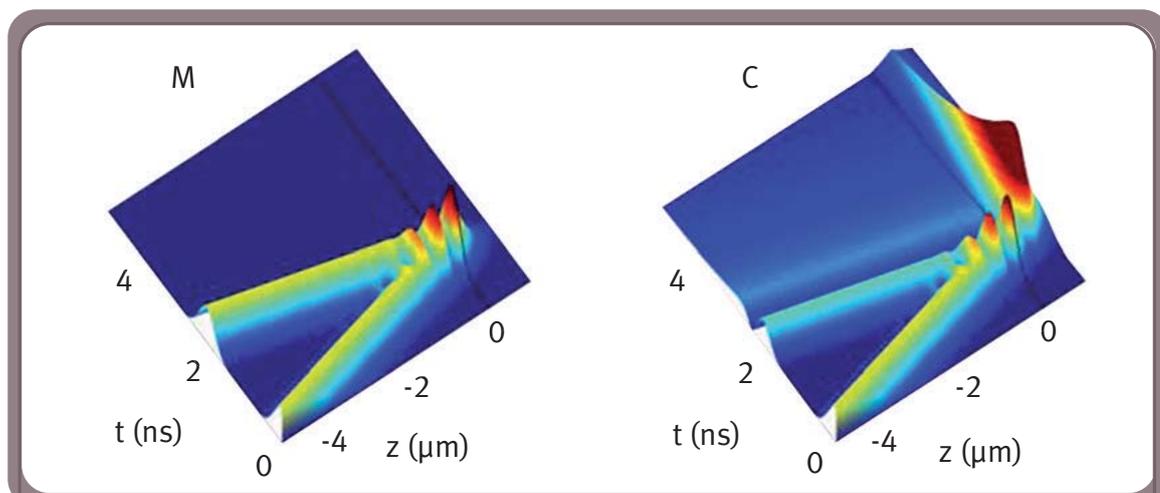


Imagen TEM donde se ven las capas de átomos, cada punto corresponde a un átomo



Esquema de uno de estos apilamientos de átomos utilizados para confinar la luz y/o el sonido.



Simulación de cómo se propaga la luz o el sonido en las nanoestructuras estudiadas, reflejándose (izquierda) o amplificándose (derecha). Esto puede verse en una simulación que evoluciona en el tiempo

### 12.4.2.2. Espectroscopia amplificada ultrasensible de moléculas

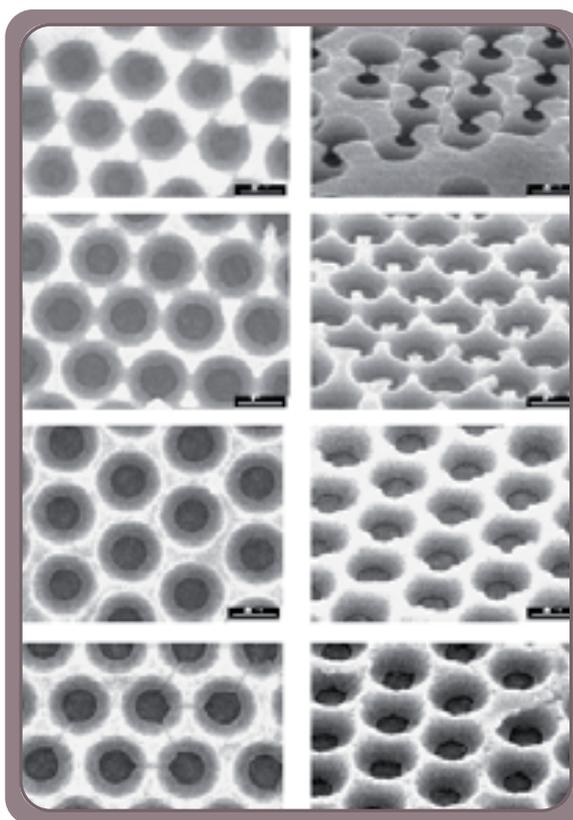
La detección ultrasensible de moléculas es hoy una de las motivaciones principales de esfuerzos interdisciplinarios enormes entre físicos y químicos. Si somos capaces de detectar e identificar una única molécula, podremos tener la técnica analítica última. Podremos analizar contenidos de compuestos en trazas minúsculas, por ejemplo en problemas de contaminación, o en aplicaciones medicas y, así, detectar cambios antes de que den lugar a procesos irreversibles, o a enfermedades. Podremos también detectar si algo o alguien mantuvieron

contacto con ciertas moléculas específicas, con enorme interés para aplicaciones forenses o de seguridad. Podremos hacer, de manera simple, secuenciamientos de moléculas complejas, como pueden ser proteínas o ADN. Podremos estudiar propiedades fundamentales sin la pérdida de información que implica estar mirando millones de procesos a la vez, todos levemente diferentes, como ocurre en las muestras macroscópicas que tienen millones de moléculas.

Una técnica altamente específica para identificar moléculas es la *espectroscopia Raman*. Una técnica basada en láseres. Es aplicada en los laboratorios de Bariloche con equipamiento de última generación y gran versatilidad. Un problema de esta técnica, sin embargo, es que las señales detectadas suelen ser débiles, limitando la cantidad de moléculas que pueden ser identificadas a cantidades relativamente grandes. Para superar esta limitación y amplificar las señales permitiendo la detección de cantidades minúsculas de moléculas, en algunos casos incluso de una sola, existen diferentes estrategias llamadas genéricamente técnicas resonantes. Una técnica que está cautivando actualmente gran atención de la comunidad internacional es la que ocurre cuando las moléculas se depositan sobre un sustrato metálico que ha sido modificado en su estructura espacial, de manera tal de confinar y amplificar el campo electromagnético del láser en la cercanía de la superficie, típicamente algunos nanómetros. Esta técnica permite amplificar miles de millones de veces la capacidad de detección.

En nuestro laboratorio hemos desarrollado la habilidad de fabricar unos sustratos metálicos, de oro o plata, que permiten este grado de amplificación que, además, son altamente reproducibles, estables en el tiempo, y sintonizables para los diferentes láseres que estén disponibles. Las nanoestructuras metálicas se ven como panales de abejas, de agujeros perfectamente ordenados, pero de oro y plata y de tamaños entre 300 y 900 nanómetros, como se ve en la siguiente imagen de microscopía electrónica:

Para fabricar estas estructuras, primero se debe depositar una capa única de pelotitas de latex de tamaño nanométricos (correspondiente al tamaño de la cavidad que se quiere lograr), luego se deposita electroquímicamente el metal (oro o plata) y, finalmente, se retiran las pelotitas lavando el latex con un solvente, y dejando el negativo de la estructura de pelotitas inicialmente formada.



Después, para detectar las moléculas, se depositan las pelotitas sobre el sustrato, se irradia con un láser y se detecta la luz emitida. Con esta técnica hemos conseguido detectar, con gran sensibilidad, moléculas y procesos químicos. Aplicaciones que ya se están trabajando son: el desarrollo de nanodetectores de glucosa, y la detección de contaminantes en la agroindustria.

### 12.4.3. Electrónica molecular

Por el Dr. Carlos Balseiro y colaboradores

Las áreas emergentes de investigación y desarrollo en materiales artificialmente nanoestructurados anticipan nuevos avances en el conocimiento que tendrán un impacto en la vida diaria tan grande como lo fueron la invención del transistor o el descubrimiento del láser.

Una de estas áreas emergentes es la nanoelectrónica o la electrónica molecular. Las nuevas tecnologías permiten fabricar circuitos con cables extremadamente delgados, con una sección de unos pocos átomos, o manipular moléculas e insertarlas en circuitos electrónicos para que actúen como elementos activos: transistores, filtros, etc.

La reducción en el tamaño de los circuitos no solo permite ahorrar recursos y disminuir costos. Lo más importante de este nuevo paradigma de la electrónica es utilizar nuevos fenómenos que solo se perciben con claridad en la nanoescala. Cuando las dimensiones del circuito se reducen en extremo, se ponen claramente de manifiesto los efectos cuánticos y es posible utilizar estos efectos para crear nuevas formas de control.

Las corrientes eléctricas en circuitos nanoscópicos se pueden reducir al punto de poder contar cuántos electrones pasan por un cable y detectar el paso de cada uno de ellos. En estas condiciones se puede percibir, por ejemplo, que un mismo electrón pasa por dos lugares al mismo tiempo. Esto es la dualidad onda-partícula en acción. ¿Cómo sería una electrónica basada en esta propiedad de la materia?

Para responder a esta pregunta, hace falta desarrollar una nueva estrategia de trabajo que incluye:

- Comprender con precisión los mecanismos de transporte electrónico en sistemas nanoscópicos y desarrollar esquemas de cálculos con capacidad predictiva.
- Desarrollar técnicas capaces de fabricar de manera controlada circuitos a escala atómica y molecular.
- Diseñar nuevos esquemas basados en las propiedades nanoscópicas de sus componentes que permitan realizar un nuevo tipo de operaciones.

La computación cuántica es, tal vez, uno de los ejemplos paradigmáticos de esta nueva forma de control de la materia.

En el grupo de Teoría del CAB se estudia el transporte electrónico a estas escalas, se desarrollan modelos y se analizan nuevos resultados experimentales con el objetivo de contribuir a la comprensión de los mecanismos básicos que dominan el comportamiento de este tipo de sistemas.

### 12.4.4. Nanopartículas y nanomateriales por métodos químicos: cómo trabajan los “chefs moleculares”

Por el Dr. SOLER-ILLIA (Químico – CNEA- BsAs)

Las *nanopartículas (NP)* son los *nanobloques de construcción* de la nanotecnología. En la mayor parte de los dispositivos, el punto crítico será el control de propiedades de uno o más tipos de NP.

Por ejemplo, en los catalizadores que se encuentran en los caños de escape de los autos, se usan NP metálicas para optimizar la destrucción de gases contaminantes como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y especies carbonosas. Se utilizan NP de metales nobles como el platino o aleaciones platino-rodio, que tienen que tener un determinado tamaño óptimo. Estos nano-objetos están soportados sobre una esponja formada por un amasijo de NP de óxidos de aluminio y cerio, que tienen que tener una gran superficie específica y al mismo tiempo, ser resistentes a las altas temperaturas de los gases de escape.

Las propiedades de las NP tienen que ver con cuatro aspectos principales:

- ¿Qué estructura tiene (qué compuesto es)?
- ¿Qué tamaño tiene?
- ¿Qué forma tiene?
- ¿Cuánta superficie específica tiene, y cómo es?

Estos son los aspectos que se deben controlar cuando queremos formar una NP con una aplicación determinada en mente. En el caso de nuestros catalizadores, por ejemplo, es importante controlar el tamaño de los dos tipos de NP, qué superficies están efectivamente expuestas, etc.

Se puede ejercer ese control construyendo los nanomateriales átomo por átomo, lo que se denomina la aproximación “de abajo hacia arriba”, o “bottom-up”. Existen técnicas que permiten crear toda clase de nanomateriales, prácticamente de cualquier forma (nanoesferas, nanocubos, nanobastones), tamaño y composición, a partir de especies atómicas o moleculares, dispersas en una solución o en un gas. Los químicos de síntesis conocen como nadie la reactividad atómica y molecular, y pueden crear objetos nanométricos muy diversos. Y en cantidades industriales. De hecho, los pigmentos, refuerzos de plásticos y polímeros, los texturantes de alimentos o los abrasivos de la pasta de dientes son, en gran parte, nanopartículas de óxidos como la sílice o la titania.

#### 12.4.4.1. ¿Cómo se hacen estas nanopartículas?

Un ejemplo clásico es la obtención de nanopartículas metálicas nanoestructuradas, que tienen propiedades muy interesantes: colores intensos, propiedades antibacterianas, entre otras. Sabemos que el oro es un metal, de color amarillo dorado, que conduce la electricidad. Las nanopartículas de oro se pueden sintetizar fácilmente por un método químico.

La reducción de sales de oro con una molécula como el ácido cítrico da lugar a una solución transparente de color rojo o violeta, dependiendo del tamaño de las NP (5 a 20 nm). Cuando son menores que 2 nm, se las llama *cúmulos o clústeres*, y son amarillentas; ya ni siquiera son metálicas. Esto se debe a un efecto de interacción de la luz con la estructura electrónica del oro nanoestructurado: *el efecto plasmón*. Las nanopartículas de oro se conocen desde hace siglos. Los romanos tenían piezas de vidrio rojas, coloreadas con nanopartículas, los fabricantes de vitrales medievales usaron NP de oro y/o plata para colorear los vidrios de las catedrales, los alquimistas vendieron NP como elixires de vida eterna, y los ceramistas del Siglo XVII usaron el nano-oro para decorar vajilla. En el Siglo XIX, el científico inglés Michael Faraday sugirió que las extrañas propiedades ópticas del nano-oro tenían que ver con el tamaño de las partículas.

Otras nanopartículas interesantes son las de los semiconductores. En este caso, la excitación con luz lleva a que estas partículas muestren luminiscencia, es decir, emiten luz. El color de

la luz que emitan dependerá del compuesto que se trate y del tamaño. Estos *nanofaroles* pueden usarse en marcación de procesos celulares.

Una característica importante de los métodos químicos de síntesis es que se pueden combinar con procesos moleculares. Un ejemplo es la capacidad que presentan ciertas moléculas para autoensamblarse, de acuerdo a su forma molecular, en objetos más complejos. El caso típico es el de las moléculas de un detergente, que se ensamblan en objetos nanométricos llamados micelas.

Los métodos químicos y de autoensamblado se pueden combinar para formar un material que envuelva a estas micelas, como una especie de *nanofósil*. Así, se obtiene un material muy poroso y con mucha superficie. En general de cientos de metros cuadrados de superficie disponible por gramo de material. Esta sílice porosa tiene 1000m<sup>2</sup> por gramo. Con 5g de material, la superficie disponible sería como la de una cancha de fútbol.

Tanta superficie disponible invita a usarse para procesos tales como catálisis o adsorción en superficie. De hecho, estos materiales se usan para descontaminar. Estas nanopartículas esféricas porosas de dióxido de titanio producidas en la CNEA son capaces de destruir, de manera muy eficiente, contaminantes orgánicos presentes en ríos o acuíferos, ayudadas por la luz del sol, en lo que se conoce como fotocatalisis.

Las películas delgadas porosas de óxidos de silicio, zirconio o titanio se pueden usar como coladores moleculares en sensores que detectan sustancias guiándose por el tamaño y la afinidad química.

#### 12.4.5. Programa de nanomedicina

Por el Dr. ZYSLER-STEREN (Físicos- CAB)

La nanotecnología no consiste en las tecnologías existentes pero de tamaño más reducido. En principio, los materiales de tamaño nanométrico presentan propiedades muy diferentes al de los materiales masivos. De hecho, muchas de estas propiedades son nuevas y no se observan en general en la naturaleza.

En el caso de la medicina se aprovechan ambos factores: nuevas propiedades y tamaño nanométrico.

Las nuevas propiedades en el caso de las nanopartículas magnéticas aparecen porque al reducir a los materiales ordenados magnéticamente, en lugar de ordenarse en su interior en forma de dominios magnéticos, se ordenan como un único dominio magnético.

La propiedad esencial de estos *monodominios magnéticos* es la presencia de un gran *momento magnético*. Se comporta como un poderoso nano-imán o nano-brújula. Este nano-imán interactúa muy fuertemente con los campos magnéticos externos, lo que permite controlar el movimiento de las partículas con un campo exterior.

##### 12.4.5.1. Aplicaciones en medicina: diagnóstico y tratamiento

- **Diagnóstico**

El método de diagnóstico con tomografías de resonancia magnética nuclear (RMN) es conocido y muy utilizado. Esta técnica se basa en estudiar la absorción de ondas de radio por parte de los

núcleos de los átomos de hidrógeno (protones) que componen el cuerpo humano. Dependiendo del sitio que se estudie del organismo (sangre, hueso, cerebro, hígado, etc.) se obtendrá una señal distinta que dará un contraste diverso en la imagen que se construye con este método. Una forma de mejorar este estudio, en el caso que el tejido no posea el suficiente contraste, es colocar iones magnéticos en el tejido de forma que su interacción con la onda de radio y el campo externo mejore el contraste de la imagen. Actualmente, se consigue mejorar notablemente las imágenes incorporando nanopartículas de magnetita (un óxido de hierro) al organismo de aproximadamente 10 nm de diámetro. Las nanopartículas de óxidos de hierro no provocan daño al cuerpo humano.

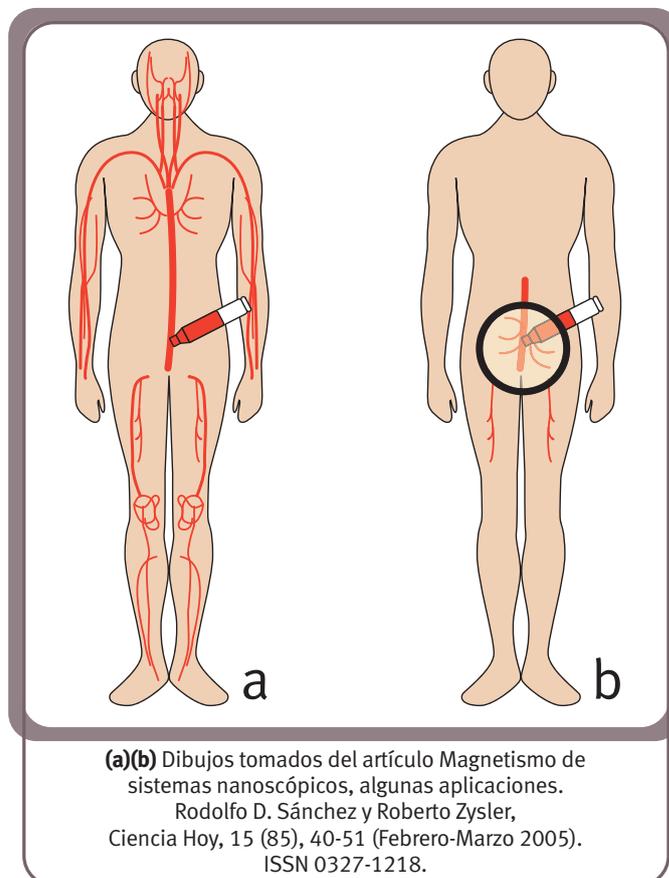
### ● Tratamiento

¿Qué pasaría si tuviésemos nano-robots o nanomáquinas que fuesen directamente a la célula enferma y realizaran específicamente sobre ella el tratamiento médico como su muerte o reparación? Sería como en la película “Viaje Fantástico” en la que un submarino fue reducido un tamaño comparable al de las células para ser introducido en el torrente sanguíneo y reparar así el tejido enfermo. ¿Ciencia ficción? Sí, mientras no sea posible en la vida real.

Actualmente, se está experimentando con diferentes alternativas para el tratamiento de enfermedades donde un vehículo transporta la medicación a las células. Se trata de partículas nanomagnéticas. Estas partículas son los nanorrobots que repararían nuestros organismos. Las partículas magnéticas se pueden dirigir dentro del cuerpo con la aplicación de campos magnéticos. Ellas pueden transportar la medicación al órgano afectado (y sólo a él) o bien quemar específicamente células cancerosas de un tumor.

Los tratamientos médicos basados en la quimioterapia tienen el inconveniente de que la medicación se distribuye en todo el organismo por medio del sistema circulatorio, bajando la eficiencia del método y, por otra parte, afectando a las células sanas del individuo (a). La idea del direccionamiento magnético del tratamiento consiste en inyectar al paciente un ferrofluido compuesto por una suspensión de nanopartículas magnéticas en la medicación o bien por nanopartículas recubiertas con el medicamento. Durante y después de la aplicación, la medicación es conducida y fijada en la zona afectada por un campo magnético (círculo claro) reduciendo el efecto sobre el resto del organismo y aumentando la eficiencia del tratamiento (b).

Siguiendo este concepto, se podría transportar hacia un lugar específico del organismo distinta medicación para curar los tejidos.



La *hipertermia* es otro ejemplo de tratamiento oncológico basado en nanopartículas magnéticas. Este tratamiento consiste en matar las células cancerosas por calentamiento. En este caso, es necesario que las células del tumor incorporen en su interior las nanopartículas. Para ello, las partículas son recubiertas previamente con polisacáridos (una especie de azúcar) o bien con un antígeno específico de la célula tumoral. Las partículas son inyectadas y guiadas al tumor con la aplicación de un campo magnético. En el primer caso, cuando están recubiertas con polisacáridos, la célula cancerígena - al tener un metabolismo mayor que las normales- incorpora un número considerable de nanopartículas en su interior. En el segundo caso, al recubrirlo con un antígeno específico, las partículas se adhieren a la célula maligna o son fagocitadas.

Una vez que las nanopartículas están dentro de las células, se aplica un campo magnético alterno (de baja intensidad ~300 gauss y de alta frecuencia ~200kHz) con lo que se pretende que las partículas oscilen dentro de las células. Esto producirá un calentamiento local, que una vez superados los 42 °C, causará la muerte de la célula. En este caso, como las células cancerosas son las que han incorporado un mayor número de nanopartículas, son las que se calentarán hasta esta temperatura en el tiempo de tratamiento (se estima del orden de 30 minutos). Las demás células sólo se “entibiarán”.

Estas ideas no son sólo una hipótesis de trabajo, ya se están haciendo experimentos en animales. Si bien los conceptos son simples, su aplicación depende de innumerables factores, tanto del desarrollo de estas tecnologías como de las respuestas del organismo a los cuerpos extraños que se están incorporando. Dependiendo de esos resultados se verá o no la aplicación de esta tecnología en los seres humanos.

## 12.4.6. Espintrónica: Electrónica de espín

*Por Laura Steren. Instituto Balseiro y Centro Atómico Bariloche, CNEA*

En el año 2007 se otorgó el premio Nobel de Física a los profesores Albert Fert y Peter Grunberg por el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante en multicapas metálicas magnéticas. Estos científicos han sido reconocidos mundialmente por haber abierto una nueva ruta en ciencia y tecnología a través de su descubrimiento realizado en 1988. Poco tiempo después de su descubrimiento, la explotación de la magnetorresistencia gigante (MRG) tuvo un impresionante impacto en la tecnología de almacenamiento de información.

Para explicarles el fenómeno de la magnetorresistencia gigantes es necesario introducir dos temas:

- Concepto de transporte eléctrico.
- Ingeniería de nanoestructuras magnéticas artificiales.

### 12.4.6.1. Transporte eléctrico

Los electrones que conducen electricidad en los metales, circulan casi libremente por entre los iones de un material cristalino. La resistencia eléctrica de un material aparece por:

- Efectos de vibración de la red cristalina, por efectos de la temperatura.
- Defectos, desorden y bordes.

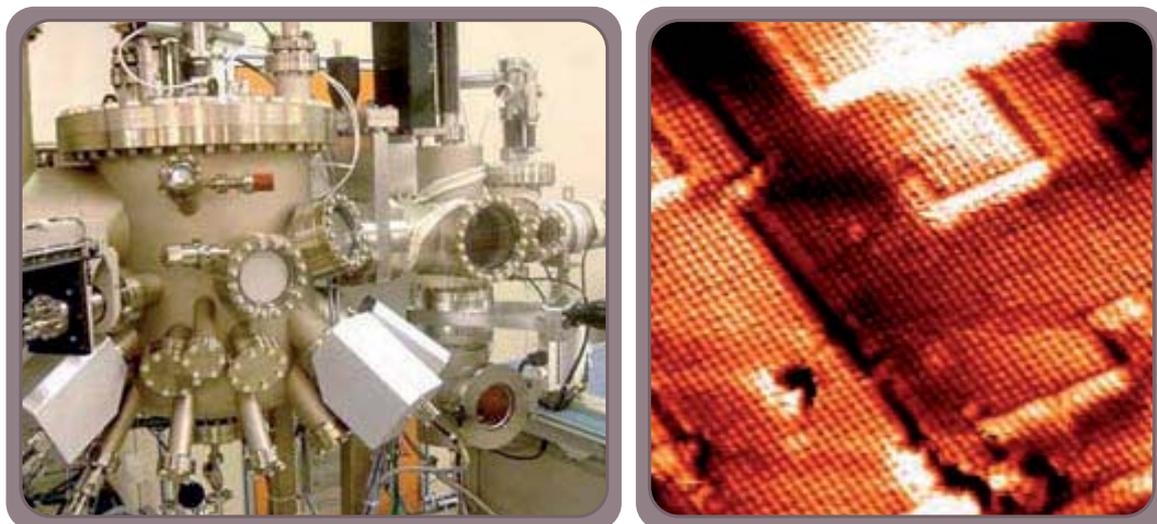
Además de la carga, los electrones tienen otra propiedad intrínseca el SPIN que puede adquirir dos valores, habitualmente se los representa con: ↓ ↑

Albert Fert en los años setenta investiga el transporte eléctrico en aleaciones magnéticas metálicas y da cuenta de que los choques de los portadores, y por ende la resistencia eléctrica, dependen del espín de los electrones.

Esta observación, junto con el conocimiento de que la longitud característica del transporte es el camino libre medio y mide  $\mu\text{m}$ , dan lugar a la idea de diseñar nanoestructuras magnéticas artificiales con propiedades específicas de transporte

#### 12.4.6.2. Ingeniería de nanoestructuras magnéticas artificiales.

En los 80': Comienzan a fabricarse estructuras que combinan distintos elementos de manera regular. Alto vacío y ultra alto vacío: películas delgadas, multicapas: control espesores a decenas de nm.



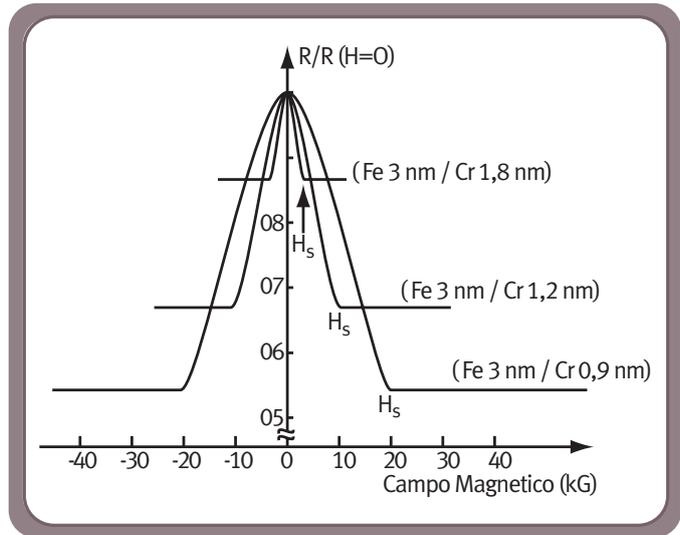
Con los conocimientos previos sobre las propiedades de transporte eléctrico en aleaciones magnéticas (A. Fert, Francia), la posibilidad de depositar de manera controlada películas delgadas de espesores de algunas capas atómicas y los primeros resultados sobre acoplamiento magnético en multicapas metálicas (P. Grünberg, Alemania) sistemas FM/NM/FM, se diseñan y fabrican multicapas metálicas con espaciadores de tres a diez capas atómicas de espesor (siempre menor al camino libre medio de los metales) para estudiar el magneto-transporte en estos sistemas.

#### 12.4.6.3. La magnetorresistencia gigante

Cuando un metal o un semiconductor se colocan en un campo magnético, su resistencia al paso de una corriente eléctrica varía. Por lo general, el efecto es pequeño y recibe el nombre de magnetorresistencia. Los ganadores del premio Nobel descubrieron una variante por la cual pequeños cambios en el campo magnético generan grandes cambios en la resistencia eléctrica. Esta propiedad resulta muy útil para leer la información grabada en el disco duro de una computadora, ya que la cabeza lectora advierte las diferencias de campo magnético que caracterizan a los

datos grabados en tales discos y las transforma en variaciones de resistencia eléctrica. Esto ha tenido un efecto trascendente en la densidad de información que se almacena en los discos rígidos de las computadoras personales y las portátiles.

Gracias al desarrollo de técnicas de fabricación de películas delgadas en la década de 1980, Fert y sus colaboradores lograron producir estructuras metálicas que alternaban capas de pequeñísimos espesores (de algunos nanómetros, es decir de unos pocos átomos) de metales magnéticos (como hierro, cobalto o níquel) con otras de metales no magnéticos (como cobre, cromo, plata u oro). Su propósito era estudiar fenómenos de transporte de carga eléctrica dependientes del espín.



En 1988 Fert observó que la resistencia eléctrica de multicapas magnéticas metálicas se reducía a menos de la mitad de su valor inicial cuando se le aplicaba un campo magnético suficientemente grande. Notó, efectivamente, que la resistencia era mucho menor cuando la magnetización<sup>3</sup> de capas vecinas estaba orientada en la misma dirección o paralela, y mucho mayor cuando la orientación entre ambas era antiparalela.

Dada la magnitud del efecto, en comparación con otros conocidos hasta el momento, a veces hasta cien veces más grande que la magnetorresistencia observada en aleaciones magnéticas, lo denominó *magnetorresistencia gigante*.

Grünberg y sus colaboradores investigaban el mismo fenómeno. Sus resultados fueron menos espectaculares y, por ende, más discutidos. El grupo alemán observó una variación de la resistencia en una estructura de solo tres capas, dos de hierro y una de cromo, de solo el 1,5%, valor similar a los observados en sistemas masivos. Ello fue consecuencia de que había realizado la medición alternando pocas capas de hierro y cromo. No porque se tratara de un fenómeno diferente. Sin embargo, la publicación de los resultados de Grünberg se demoró varios meses, mientras trataba de convencer a los árbitros de la revista, en que finalmente saldrían, de que se trataba de un efecto nuevo y de una observación de importancia (G. Binasch et al., 'Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange', Physical Review Letters B, 39, 4828, 1989).

Grünberg solicitó y obtuvo en 1994 una patente sobre el efecto que había descubierto: *Magnetic field sensor with ferromagnetic thin layers having magnetically antiparallel polarized components*. La vendió a IBM en 1995. Luego del considerable esfuerzo realizado en los Estados Unidos mediante la labor de un inglés radicado allí, Stuart Parkin, de adaptar las estructuras utilizadas en el laboratorio científico a las necesidades industriales, la empresa comenzó a comercializar los primeros lectores de discos rígidos que se valían de esta tecnología. Ello sucedió en 1997. El costo de dichos dispositivos cayó abruptamente a menos de una centésima parte de su valor. Una cabeza que utilice el efecto de magnetorresistencia gigante puede registrar pequeños cambios de los campos magnéticos

<sup>3</sup> Magnetización: es una magnitud asociada al magnetismo del material y que lo cuantifica.

al recorrer el disco y transmitir cambios, proporcionalmente mucho más grandes, en la resistencia eléctrica. Las variaciones en esa resistencia representan los unos y ceros de la información leída.

Con este descubrimiento nació, además, un nuevo campo de investigación: el estudio de fenómenos de transporte de carga eléctrica en nanoestructuras magnéticas. Se lo denominó espintrónica.

Actualmente, científicos y tecnólogos están dedicados a poner en juego la variable de espín en transistores y otros dispositivos electrónicos, con grandes expectativas referentes al descubrimiento de nuevos fenómenos y al desarrollo de funcionalidades originales. Es investigación fundamental estrechamente vinculada con el desarrollo tecnológico.

Diez años separaron el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante de su aplicación en los lectores de discos de las computadoras personales. Fue uno de los casos más exitosos de rápida transferencia de conocimiento básico a aplicaciones tecnológicas.

En Argentina se investiga y desarrolla acerca de:

- Transporte polarizado en espín en films y multicapas. Dispositivos.
- Investigación de nanoestructuras únicas => manipulación

En el Centro atómico Bariloche se trabaja en la fabricación, caracterización estructural y magnética de películas, multicapas, nanopartículas, hilos y tubos de tamaño controlado (nm). En el diseño, elaboración e investigación de dispositivos magnetoresistivos. Y se realizan estudios del magnetismo y transporte electrónico de nanoestructuras magnéticas artificiales con distintas funcionalidades.

#### ● **Desafíos**

- Avanzar en el conocimiento fundamental de nuevos fenómenos y materiales.
- Comenzar etapas de desarrollo de dispositivos con aplicaciones tecnológicas definidas.
- Lograr una “masa crítica de investigadores y estudiantes”
- Educación

## **12.5. MICROSCOPIO DE FUERZA ATÓMICA (AFM)**

Por LEYVA-LEVY (Química – Físico)

En los últimos años se ha desarrollado un nuevo tipo de microscopía: *la microscopía por sondas*. Este tipo de microscopías utiliza una punta como interfaz para sensar.

A diferencia de los microscopios tradicionales, en que se usa luz o haces de electrones para visualizar un objeto, en el caso de las microscopías que utilizan sondas hay una punta que se va desplazando sobre el objeto a estudiar.

Por intermedio de diferentes mecanismos de interacción entre la punta y el objeto de estudio, se obtiene una imagen, o sea una representación bidimensional o mapa de la superficie explorada. Esta técnica permite estudiar la morfología, la topografía y otras propiedades locales con una altísima definición espacial. Para fijar ideas, digamos que el tamaño de la escala en que se pueden observar detalles es la escala sub-micrométrica.

Una caricatura del método de funcionamiento, consiste en pensar en la punta de un dedo que va recorriendo la superficie a explorar, mientras se envían señales que permiten formar una representación del objeto estudiado.

Estas técnicas pasaron de ser utilizadas por unos pocos especialistas, en general los que se construían sus propios equipos, a ser técnicas de uso frecuente y contar con gran número de usuarios y decenas de empresas que venden instrumental y accesorios para microscopía por sondas.

A su vez, al disponer de estas técnicas de observación, se han desarrollado nuevos métodos en nanotecnología: definición y obtención de estructuras de escalas nanométricas.

### 12.5.1. Descripción general

Las puntas utilizadas consisten en pequeñas -muy pequeñas- agujas, de las cuales se utiliza una región muy limitada, de unos 10 nanómetros de extensión. La distancia entre la superficie a estudiar y la punta puede variar, dependiendo del tipo de técnica utilizada, entre unos 10 a 0.1 nanómetros.

En el caso del microscopio STM (Scanning Tunneling Microscope) se mide la corriente eléctrica de tuneleo entre la punta y la superficie. En los casos de AFM (Microscopio de Fuerza Atómica) las fuerzas de van der Waals determinan la interacción entre punta y sustrato. Una variante de este caso, en la que la punta es magnética, permite obtener mapas magnéticos de la superficie estudiada.

Esta descripción corresponde al estudio de una propiedad en una única región. Esta propiedad depende de la distancia entre la punta y la superficie, y se precisa un muy buen método de control del acercamiento: no se quiere que la punta choque contra la superficie, ni estar tan lejos que no se perciba la interacción.

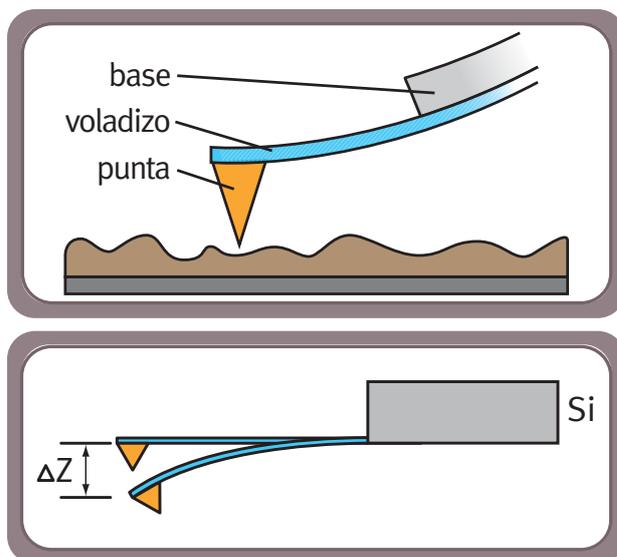
Si lo que queremos es estudiar zonas más amplias, poder tener un *mapa* con las variaciones de esta propiedad, es necesario hacer que esta punta se desplace a lo largo de la superficie que queremos estudiar.

### 12.5.2. Acercamiento

En el caso del Microscopio de Fuerza Atómica, el principio de funcionamiento se basa en la medición de la fuerza de interacción entre una punta y la superficie de la muestra.

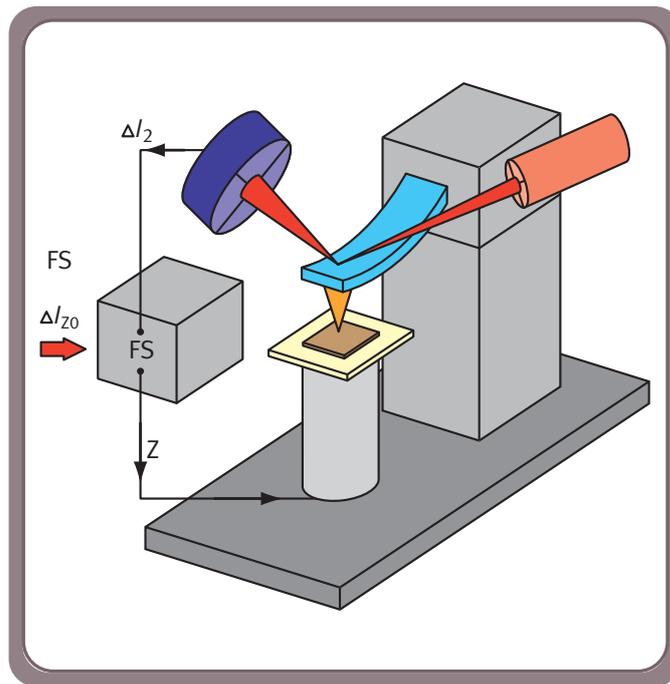
En la figura es un esquema de este tipo de mediciones. Se utilizan sondas compuestas por una base, un fleje (cantilever) y la punta al final del mismo.

La fuerza que siente la punta, proveniente de la interacción con la superficie, se manifiesta en la inclinación del fleje. Midiendo esta deflexión se puede evaluar la interacción superficie-punta.

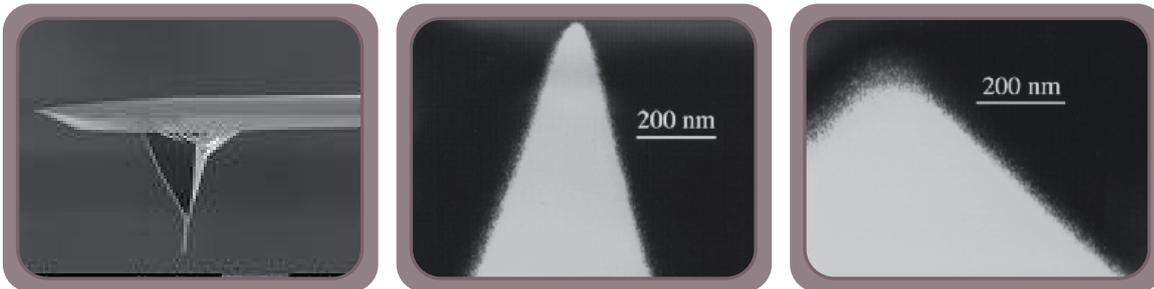


Se utiliza un método óptico para sensar la deflexión del fleje que sostiene a la punta. Se hace incidir un haz láser y se mide la reflexión en su cara posterior. Este método resulta muy sensible: un conjunto de foto-diodos permite sensar pequeñas variaciones en la deflexión y torsión del fleje. Luego, se traduce esta información, para determinar la estructura de la superficie estudiada.

A su vez, este método permite que no se choque la punta contra la superficie. Mediante un lazo de realimentación se controla la altura relativa del conjunto base-fleje-punta. Utilizando señales eléctricas aplicadas a un material piezoeléctrico se obtienen deformaciones controladas del sistema, las que permiten mover a la punta.



### 12.5.3. Puntas



Existen métodos de operación en modo contacto, o contacto intermitente, cada uno de ellos con sus ventajas y defectos. La fuerza de interacción punta-superficie tiene una componente normal y otra paralela a la superficie; es atractiva a distancias grandes y es repulsiva a distancias cortas, comparadas con 1 nm.

### 12.5.4. Desplazamiento

El desplazamiento de la punta sobre la superficie a estudiar se realiza también por intermedio de materiales piezoeléctricos. Se puede controlar la velocidad y dirección del barrido.

El equipo que se muestra en el video está montado sobre una base antivibratoria, de manera de aislar al sistema de oscilaciones mecánicas externas. El ruido es otra de las fuentes de interferencia.

Se muestra el cabezal, la posición en que se ubica la punta, el reflejo del laser. La muestra es ubicada en la parte inferior y, eventualmente, sobre ella se realizan conexiones eléctricas.

Una vez montado el equipo, se lo opera por intermedio de un software que provee la empresa constructora. Esto permite el acercamiento de la punta al sustrato, y el barrido sobre la superficie de la muestra.

El equipo que se muestra en el video es la versión más simplificada de una serie de unos pocos equipos, que operando bajo el mismo principio, están disponibles en el país (INIFTA-LaPlata, CAB-CNEA-Bariloche).

## 12.6. SÍNTESIS DE NANOESTRUCTURAS

*Por el Grupo del Dr. Rodolfo D. Sánchez y sus colaboradores: Dr. Juan De Paoli, Lic. Javier Curiale, Lic. Martin Saleta, Centro Atómico Bariloche. Otros colaboradores: H. Troiani, H. Pastoriza (CAB), P. Levy, A.G. Leyva (Bs As), R. Torresi (Brasil).*

### 12.6.1. Efectos superficiales y anisotropías magnéticas en nanopartículas y nanotubos de óxidos. Nuevos Materiales para electrónica de espín.

#### 12.6.1.1. ¿Cuál es el objetivo del grupo?

Nuestro grupo investiga óxidos cristalinos y los cambios que ocurren en las propiedades magnéticas y eléctricas por la disminución a escala nanométrica del tamaño del cristal. También estudiamos cómo afecta a estas propiedades la forma de un objeto que se pueda construir a partir de nanocristales.

En general, los óxidos, dependiendo de la clase de átomos que lo componen, de la estructura espacial que adoptan y de otras variables, presentan una diversidad importante en cuanto a sus propiedades físicas. Podemos encontrar óxidos que sean excelentes conductores de la electricidad o pésimos conductores del calor, que cambien su resistencia eléctrica al aplicar un campo magnético, su aspecto puede ser diferente y estos pueden ser transparentes, de algún color o simplemente negros. Prácticamente, todos los fenómenos que se estudian en la Física del Estado Sólido están presentes en los óxidos. En particular, cuando encontramos un óxido interesante y conocemos cómo es su comportamiento tratamos de reducir el tamaño de los cristallitos y ver qué ocurre en la nanoescala. Por otro lado, una de nuestras actividades está centrada en explorar la influencia de la forma del objeto sobre las propiedades magnéticas y eléctricas en la escala nanométrica. Tratamos de cuantificar los efectos que provienen de la superficie y que suelen ser importantes a tal punto de cambiar las propiedades magnéticas del material.

#### 12.6.1.2. ¿Por qué se investiga la resistencia eléctrica de los óxidos?

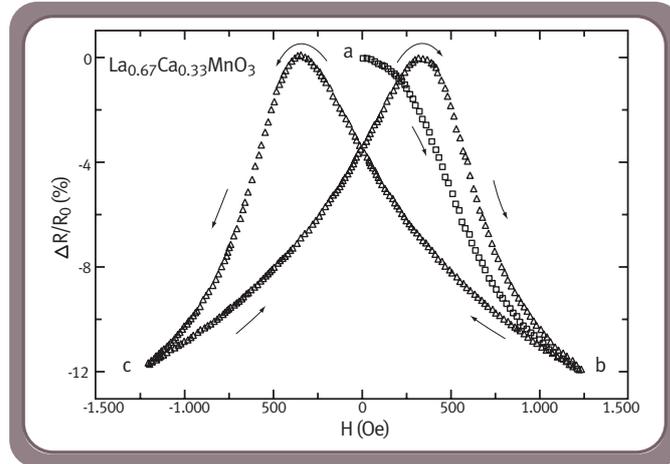
Al aplicarse un campo eléctrico (o un voltaje) al material, los electrones comienzan a circular en una dirección (la dirección del campo eléctrico). Podemos decir que el grado de dificultad que tendrán los electrones en atravesar una punta del material hacia la otra es la resistencia eléctrica del material. Uno de los casos que estudiamos presenta diferentes valores de resistencia al variar el campo magnético, ésta disminuye. Es decir: al aplicar un campo magnético disminuimos las dificultades que tienen los electrones de atravesar el material.

Actualmente, esto se está aplicando en las lectoras de los discos rígidos de las computadoras, pero además tiene un importante número de aplicaciones como, por ejemplo, en sensores.

En las tecnologías modernas para automóviles se calcula que más de una decena de esas aplicaciones se van a utilizar

En el gráfico de abajo mostramos un ejemplo de cómo varía la resistencia con el campo en un óxido. A la derecha están representados los cristalitos o granos del óxido, en cada borde de grano hay un obstáculo o barrera para los electrones que les resulta muy difícil pasar de un grano a otro. Pero al aplicar un campo magnético los momentos atómicos de cada grano se alinean en dirección del campo magnético. Esto hace que los electrones encuentren un camino, o un túnel, para atravesar la barrera intergranular.

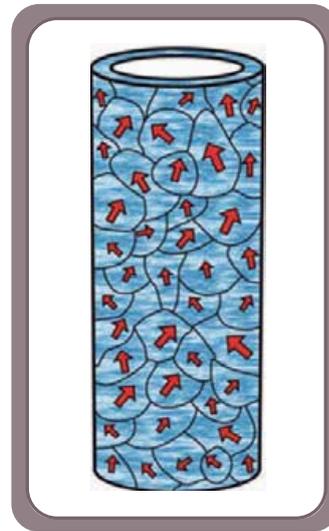
En la mecánica cuántica este efecto se conoce como *Efecto Túnel*. Al encontrar los electrones este túnel cuando se aplica un campo magnético, la resistencia eléctrica del material disminuye notablemente. Esto se conoce como *electrónica de espín*.



### 12.6.1.3. ¿Y qué se puede decir del magnetismo de estos tubos?

Podemos pensar que cada grano o cristal que forma la pared del nanotubo es un pequeño imán. Como todos los imanes, cuando tienen otro imán cerca, comienzan a moverse y buscan una situación que sea cómoda para ambos, de equilibrio. En el nanotubo pasa lo mismo. Solamente que se trata de muchos granos en una pared y, por lo tanto, muchos imanes para tratar de buscar posiciones de equilibrio. Esta fuerza que moverá a un imán cuando hay uno próximo y trata de acomodarlos en una configuración de equilibrio, se llama *interacción dipolar*. Para saber la magnetización de nanotubos se usan unos aparatos llamados *magnetómetros*. Se miden unas curvas de magnetización que permiten hacerse una imagen de lo que ocurre.

En la siguiente figura podemos ver cómo los momentos magnéticos de los cristalitos se alinean preferentemente en la dirección del tubo, compitiendo con la interacción dipolar que trata de desalinearlos.



### 12.6.1.4. ¿Qué otros nanotubos estudian?

Otros de los nanotubos que se estudian son planos de óxidos de vanadio separados entre sí por moléculas orgánicas muy similares a las moléculas que forman los detergentes.

En particular, estos son interesantes para catálisis o como electrodos en baterías de litio.

A diferencia de los anteriores nanotubos, estos son multipared (la pared está formada por varios planos de átomos). Estos tubos casi no tienen momentos magnéticos y los pocos que tie-

nen son perjudiciales para su uso como electrodo en las baterías. Nuestras técnicas magnéticas son muy sensibles y nos permiten saber si tenemos la presencia de estos átomos magnéticos en cantidades ínfimas.

## 12.7. SENSORES DE GASES

Por D. RODRÍGUEZ, (Físico; Bs.AS)

Una aplicación de los nanomateriales son las películas sensibles de los sensores de gases.

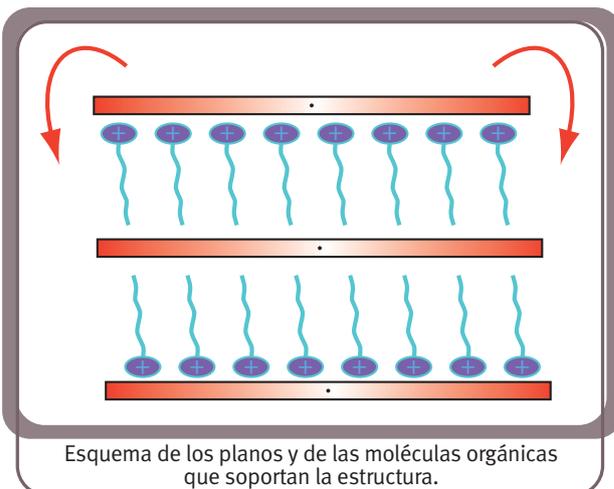
- ¿Qué es un sensor de gas?  
Un sensor de gas consta de dos partes principales:
- Un elemento sensible o activo, cuyas propiedades físicas o químicas cambien en presencia de un gas. Aquí juegan un rol importante las nanoestructuras que aumentan la sensibilidad de los sensores.
- Sensores de gas más utilizados: microbalanzas de cuarzo, polímero conductor y MOS (Metal –Óxido –Semiconductor).

### 12.7.1. El polímero conductor

El sensor se comporta como una esponja absorbiendo las moléculas del gas detectado e inflando al sensor, lo que modifica su resistencia eléctrica. En otros casos, la estructura polimérica es iónica, donde la conductividad eléctrica se debe a la presencia de contracciones. Cuanto mayor nanoestructurada es la esponja del material sensor, mayor es la sensibilidad del mismo.

### 12.7.2. La tecnología de sensores de óxido metálico

El Sensor MOS es un dispositivo que opera por principio resistivo. Las moléculas de gas experimentan un proceso de reducción en la superficie de la película produciendo un cambio en la resistividad. El sensor debe operar entre 300 y 500 °C para tener una alta sensibilidad. La selectividad puede ser modificada, dopando el óxido metálico con otro elemento. Por ejemplo: Pt, Pd, Au, etc.



Esquema de los planos y de las moléculas orgánicas que soportan la estructura.



Película sensible nanoestructurada de dióxido de estaño que permite oler las moléculas de gas que se pegan en su superficie

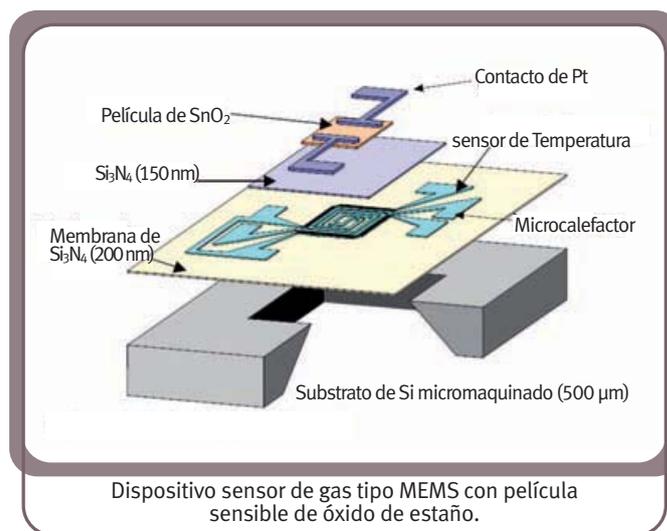
## 12.7.3. Sensor de gas tipo MOS con tecnología MEMS

### 12.7.3.1. La tecnología MEMS o de Microsistemas

Se denomina tecnología MEMS (Micro ElectroMechanical Systems) a la tecnología de fabricación que combina componentes mecánicos y electrónicos miniaturizados, que dan origen a dispositivos que permiten sensor o actuar a nivel microscópico. Con esta tecnología se puede fabricar sensores de gas con bajo consumo y mayor sensibilidad que los sensores convencionales de mayor tamaño.

La CNEA está trabajando de forma exitosa, en colaboración con CITEFA y con un laboratorio italiano CNR (Bologna) desde el año 1998.

A continuación se muestra un esquema de un sensor de gas fabricado con tecnología MEMS.



### 12.7.3.2. Narices electrónicas.

Una Nariz electrónica (NE), a semejanza del sistema olfativo humano, permite identificar olores. La NE consta básicamente de tres partes que operan en serie ante una muestra de olor: el manipulador de muestras, el conjunto de sensores y el sistema de procesamiento de la señal. La salida de una nariz electrónica puede ser la identificación de un tipo de olor, una estimación de su concentración o las propiedades características de un olor como podría ser percibida por un humano. La NE esta formada por un conjunto de sensores de gases.

### 12.7.3.3. ¿Por qué *electronizar* el olfato?

Con una NE es posible, en principio, registrar olores inaccesibles al olfato humano y, más aún, hacerlo en forma continua durante períodos prolongados o en sitios insalubres.

Se los puede incorporar a sistemas automáticos de seguimiento de procesos industriales, lo que se denomina monitoreo en tiempo real.

Además, un dispositivo electrónico de esta naturaleza puede superar muchos de los problemas asociados al uso de paneles de expertos humanos. Desaparecen efectos de la variabilidad individual, adaptación (se hace menos sensible el olfato con exposiciones prolongadas en el tiempo), fatiga, infecciones, estado mental, subjetividad y exposición a olores peligrosos. Las narices electrónicas pueden crear perfiles de exposición a olores más allá de las capacidades humanas o de las técnicas de cromatografía gaseosas y espectrometría de masas.

Prototipo **precompetitivo P3** (2004) dentro del proyecto PID131: Versión Rack.

A continuación mostramos las últimas narices electrónicas desarrolladas en CNEA. Es importante destacar que son portátiles para aplicaciones específicas. Una de ellas es para oler la frescura de alimentos y la otra fue desarrollada especialmente para la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires



Narices electrónicas portátiles desarrolladas en CNEA durante los años 2006-2007.

## 12.8. NANOBIOCHIP PARA DETECCIÓN DE CÁNCER, PATÓGENOS Y MUTACIONES.

Por LERNER-PEREZ- (biotecnologos)

En el grupo estamos desarrollando una nueva clase de Nanobiosensores combinando propiedades físicas, químicas y biológicas para detectar todo tipo de enfermedades.

Una rápida, selectiva y sensible detección del agente causal de la enfermedad tiene un gran potencial para impactar significativamente en la salud humana, ya que posibilita el diagnóstico en estadios tempranos de la enfermedad en cuestión, permitiendo implementar una terapia efectiva y fundamental. Por ejemplo en enfermedades como el cáncer.

Una de las particularidades de estos dispositivos es que la detección es electrónica y que utilizan nanotubos. Estos nanotubos tienen una sensibilidad única a las perturbaciones del ambiente, pudiendo medir una característica eléctrica particular al aplicar un voltaje.

La detección electrónica de biomoléculas emerge como una nueva alternativa efectiva a los métodos de detección actuales.

Las ventajas de esta tecnología con respecto a los métodos conocidos son:

- Pequeño tamaño.
- Ultra sensibilidad.
- Muy bajo costo.
- Fácil de usar (no requiere manejo por parte de personal especializado).
- Obtención rápida de resultados.
- Permite detectar múltiples enfermedades al mismo tiempo con una sola muestra.

Estos sensores servirán para detectar todo tipo de enfermedades, desde infecciones virales o bacterianas, como ántrax, cólera o HIV, entre otros; hasta todo tipo de marcadores tumorales para detectar cáncer de colon, mama o útero, entre otros.

## Bibliografía

---

- Plan Estratégico de CyT – SECYT; [www.secyt.gov.ar](http://www.secyt.gov.ar)
- Fundación Argentina de Nanotecnología, [www.mecon.gov.ar/fan](http://www.mecon.gov.ar/fan)
- EuroNanoForum, [www.nanoforum.org](http://www.nanoforum.org)
- Nacional Nanotechnology Initiative (EE.UU.) <http://www.nano.gov>
- Hacia una estrategia europea para las nanotecnologías Bruselas, 12.5.2004, COM(2004) 338 final, COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN.
- Nanotechnology in Europe - Ensuring the EU Competes Effectively on the World Stage , Survey & Workshop organised by Nanoforum in Düsseldorf, Germany, 2007.
- NANOTECHNOLOGY, The Industrial Revolution of the 21st Century, Fundación de la Innovación Bankinter (2006).
- Nanotechnology Homepage of the European Commission, [www.cordis.lu/nanotechnology](http://www.cordis.lu/nanotechnology)