

Nanotecnología: La última revolución industrial

María A. Castellanos-Román*

Abstract (Nanotechnology: the last industrial revolution. An overview of the world of small things)

Introducción

Hacia fines de los años cincuenta, la miniaturización estaba en boga y el acomodar unos cuantos componentes en un *chip*—disco pequeño de un material semiconductor que sirve de base para un circuito integrado— o almacenar información en un microfilm era todo un reto. Por esas fechas, el 29 de diciembre de 1959, el extraordinario físico Richard Feynman, cuya fotografía se presenta en la figura 1, en su célebre plática: “Hay mucho espacio en el fondo” (“There’s Plenty of Room at the Bottom”) planteó el problema de manipular y controlar cosas a muy pequeña escala, más allá de la miniaturización; decía que una célula es demasiado pequeña para guardar información y realizar tantas actividades por lo que “no hay nada en las leyes físicas, que yo vea, que digan que los elementos de una computadora no puedan hacerse notablemente más diminutos del tamaño que tienen ahora”. Inspirado en sistemas biológicos, luego dejó boquiabierto a su público, cuando presentó un conjunto de temas

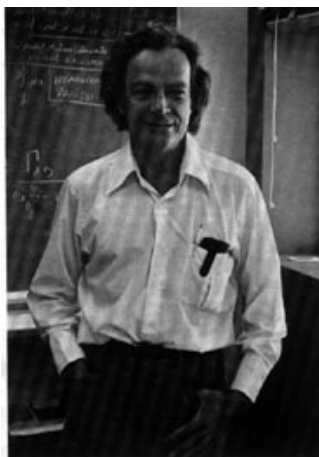


Figura 1. Fotografía de Richard Feynman en 1974 (Appenzeller, 1991).

—actuales líneas de investigación— entre las que sobresalen: el esculpido de líneas, de unos cuantos átomos de ancho, con haces de electrones; la construcción de circuitos en escala de angstroms para hacer nuevas clases de computadoras, la manipulación de átomos para controlar de verdad las propiedades de la materia, y varios más (Appenzeller, 1991). Sus predicciones son ahora toda una realidad, se van cumpliendo con asombrosa nitidez y cada vez sus alcances son más amplios; pues afectan y modifican la mayoría de los

ámbitos en la vida del ser humano. Ya para 1991, el número de transistores que se podían integrar a un solo *chip* de silicio era de un millón aproximadamente. En 1990, los científicos americanos fueron los pioneros en depositar átomos sobreenfriados de xenón sobre un sustrato de níquel para escribir las siglas IBM, utilizando el microscopio de tunelaje con barrido (Scanning Tunneling Microscope, STM), con el cual es posible registrar la imagen de la superficie de materiales conductores en la escala atómica con detalle, además de que permite la manipulación de átomos con mucha precisión; pero pocos meses después los científicos japoneses esculpieron la frase “PEACE’91 HCRL” sobre un medio de azufre pero a temperatura ambiente (Crawford, 1991).

En la actualidad las técnicas de microscopía electrónica con barrido de alta resolución para la caracterización en escala atómica se han diversificado y perfeccionado tanto que permiten la observación directa del movimiento de los átomos sobre superficies semiconductoras, la migración de fronteras de grano—proceso fundamental relacionado con la estabilidad estructural de materiales policristalinos—; la eliminación de capas de átomos de manera individual de una cara de un cristal dado, etcétera (Tanaka y Kizuka, 1997).

El mundo de la nanoescala

El prefijo *nano* del griego *nanos* (pequeñísimo) pasó al latín como *nanus* con el significado de enano (Moliner, 1992). Este prefijo se aplica para indicar que son mil millones de veces menores las unidades de distancia, tiempo, etcétera, que la unidad que le precede; por lo que un nanómetro (nm) equivale a una mil millonésima de metro (10^{-9} m) o bien a una millonésima de milímetro (10^{-6} mm). Como referencia, $1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA}$; además, 1 \AA es el tamaño promedio de un átomo. El tamaño de una nanopartícula—aceptado actualmente— está comprendido entre 1 y 100 nanómetros (Convocatoria, 2003). Para tener una noción más clara de las dimensiones, es mejor comparar los tamaños relativos de algunas de las diversas estructuras que se generan en biología, vía síntesis química y por micro/nanofabricación—construcción de dispositivos en tamaños micro/nanométricos—. En la figura 2 se muestra un esquema de los tamaños relativos de estas estructuras (Whitesides, *et al.*, 1991). Las nanopartículas o puntos cuánticos semiconductores localizados alrededor de 40 nm en la figura mencionada se consideran como moléculas gigantes con 10^3 – 10^5 átomos, hechas de materiales semiconductores inorgánicos tales como Si, InP, CdS, CdSe,

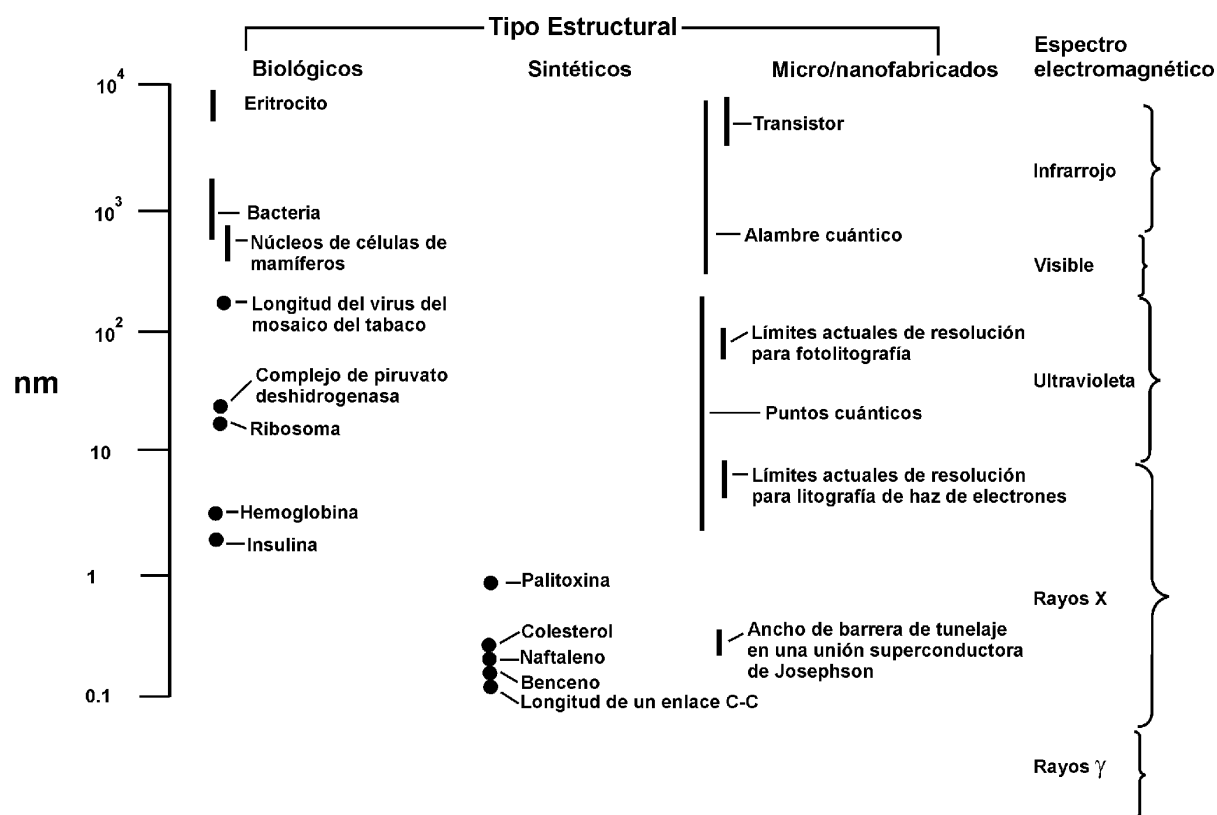


Figura 2. Comparación de los tamaños relativos de las estructuras generadas en biología, síntesis química y micro/nanofabricación. La escala de la izquierda es logarítmica y el espectro electromagnético (a la derecha) se incluye como referencia. Las estructuras preparadas sintéticamente se concentran en el intervalo de 0.1 a 2 nm. Con la aplicación de síntesis química por autoensamblaje es posible obtener estructuras en tamaños de 10 a 10³ nm. Las estructuras de biología y de micro/nanofabricación presentan dimensiones de 1 a 10⁴ nm. (Modificada de Whitesides, *et al.*, 1991).

etcétera, son mayores que los “cúmulos moleculares” tradicionales comunes en química y mucho menores que las estructuras del orden de un micrómetro (1 μm = 10⁻⁶ m), manufacturadas por técnicas litográficas –impresión con molde– en la industria electrónica (Zunger, 1998).

El nombre de nanopartículas tuvo su origen en 1857, durante una conferencia acerca de las propiedades ópticas del oro, cuando Michael Faraday enfatizó que: “Una mera variación del tamaño de las partículas en sus soles de oro, produjo varios colores”, refiriéndose a sus estudios de partículas coloidales de oro con tamaños en la escala de nanómetros. En la tabla 1 se describen los distintos colores que

adquieren las unidades estructurales (*building blocks*) de oro de acuerdo con sus tamaños. Las unidades estructurales, como su nombre lo indica, son la base para elaborar algo más, ya sea un cúmulo mayor, un nanodispositivo u otra cosa.

De manera general, a las nanopartículas también se les refiere como nanomateriales, algo que tiene una dimensión en la escala de nanómetros; es decir, son nanoescalares. Lo novedoso en esta dimensión es darse cuenta de que los aspectos fundamentales de estructura, de energía, y de propiedades son comunes, ya sea que se trate de un semiconductor, un nanotubo de carbono –fullerenos orgánicos, que pueden tener un comportamiento semiconductor o metáli-

Tabla 1. Unidades Estructurales del oro.

Propiedades	Átomos	Clusters	Nanopartículas	Partículas	Película, bulto
Tamaño	1 Å	< 1 nm	3–30 nm	30–500 nm	> 500 nm, mm, cm
Color	Incoloro	Naranja, no- metálico	Rojo, metálico, “transparente”	Metálico, turbio, carmesí a azul	Dorado, metálico

Modificado de Mulvaney, 2001.

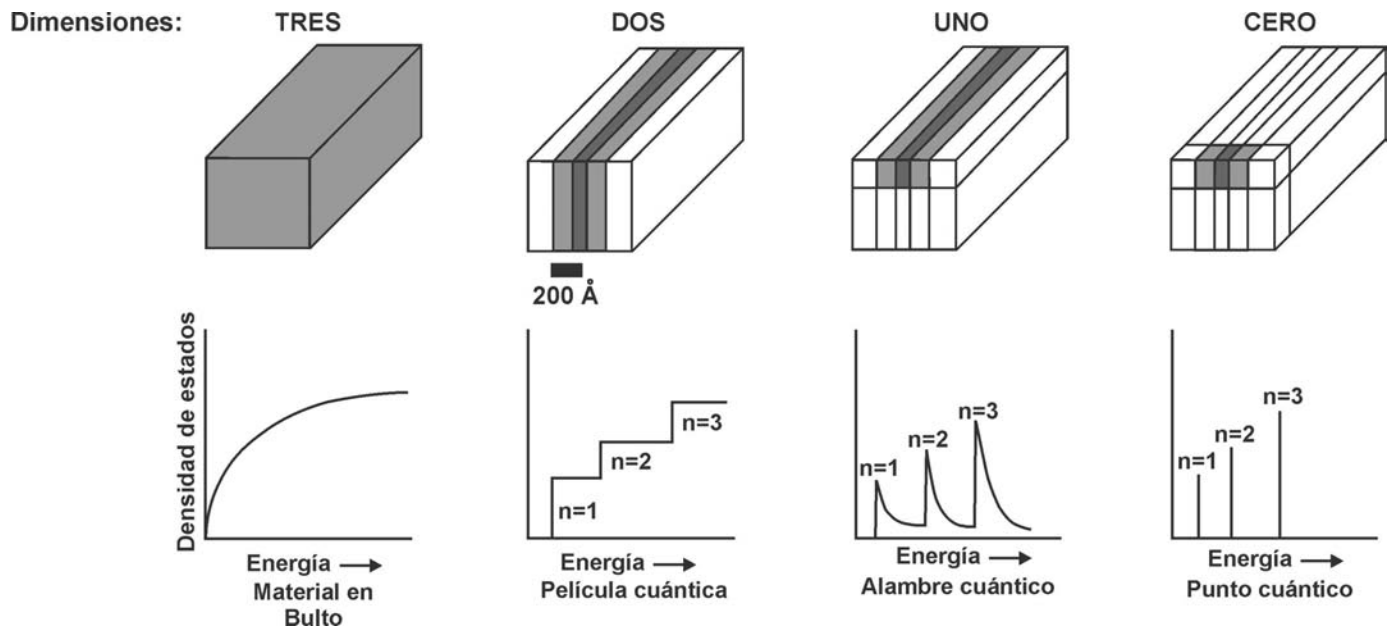


Figura 3. Efectos que se presentan al reducir el número de dimensiones de un material. Al moverse los electrones en un espacio confinado se les obliga a ocupar diferentes estados energéticos (Modificada de Corcoran, 1990; Nozik y Miñae, 1998).

co-, un superconductor, un mineral o una partícula de un aerosol contaminante. Una *definición* amplia de nanomaterial sería: aquel que posee dimensiones mayores que un cúmulo molecular, pero más pequeñas que aquellas de un material en bulto, siendo lo más importante que presenta una propiedad interesante, diferente a cualquiera de los dos tamaños (Navrotsky, 2003). El insólito interés en los nanomateriales y la abundante actividad científica desatada en torno a su investigación se debe a que sus propiedades físicas y químicas pueden ser moduladas sistemáticamente por la variación del tamaño, de acuerdo con las leyes del escalamiento, cada vez mejor establecidas (Alivisatos, 1998).

Regiones de cuantización

Cuando se disminuye el tamaño —o sea, el número de dimensiones— de un material, se obliga a los electrones a ocupar diferentes estados energéticos, en los que pueden estar dentro de las partículas, porque se reduce el espacio donde pueden moverse. La dimensionalidad de un material se puede reducir al emparedarlo entre dos capas de otro material que tenga electrones más energéticos. Este confinamiento cambia la densidad de estados electrónicos —o niveles de energía específicos— que serán llenados por los electrones que van arribando. En la figura 3 se ilustran los efectos de la dimensionalidad de la cuantización en la densidad electrónica de estados (Corcoran, 1990). Debido al confinamiento espacial y al hecho de que la proporción de la superficie al volumen se ve notablemente aumentada es

posible que aparezcan nuevos efectos y propiedades que no existen en las unidades estructurales ni en los materiales en bulto del material en estudio. Según sea el lugar donde se encuentren confinados los portadores de carga —electrones y huecos—, es posible definir tres regiones de cuantización. El confinamiento en dos dimensiones crea estructuras que se llaman “pozos cuánticos” o “películas cuánticas”. Esto se debe a que las primeras estructuras fueron descritas a principios de los años setenta, por la mecánica cuántica, mediante el modelo de una partícula confinada en una caja. El confinamiento de portadores de carga en una dimensión produce “alambres cuánticos” —nanoalambres, nanotubos—; estos sistemas unidimensionales casi siempre presentan un diámetro del orden de nanómetros. Idealmente, cuando una partícula esferoidal tiene dimensiones nanométricas en cualquier dirección en que se le mida, se considera como cero dimensional (Mendoza, 2003); a estas nanopartículas se les denomina “puntos cuánticos” (*quantum dots*, QD's) también llamados nanocristales, átomos artificiales, puntos coloidales, cajas cuánticas o nanomateriales, según sea el contexto donde se les cite.

Un ejemplo de las estructuras cuánticas de los semiconductores de los elementos de los grupos III–V, consiste de una película delgada del semiconductor GaAs, de banda prohibida —energía necesaria para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción— pequeña, $E_g = 1.42$ eV, emparedado entre dos películas de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, un semiconductor de banda prohibida mayor, $E_g = 2.0$ eV, donde el

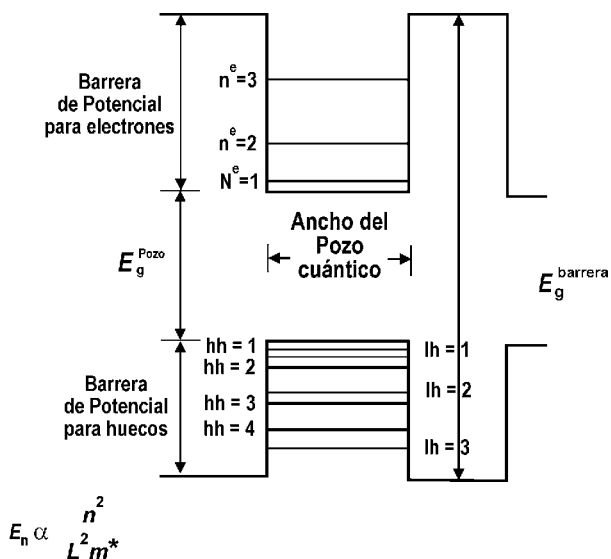


Figura 4. La cuantización en pozos cuánticos, donde E_n es el nivel cuántico, n es el número cuántico, L es la amplitud del pozo cuántico, y m es la masa efectiva (modificada de Nozik y Micic, 1998).

semiconductor GaAs constituye la región del pozo cuántico y el segundo material de banda prohibida más grande, la región de la barrera de potencial para los electrones y huecos. Si la película de GaAs es de aproximadamente 30 nm, la

cuantización de los niveles de energía se presenta tanto para los electrones como para los huecos, como se puede apreciar en la figura 4 (Nozik y Micic, 1998).

La estructura electrónica de los nanotubos de carbono de una sola pared no está totalmente comprendida, se asignan con dos números enteros (n, m) de características semiconductoras, relacionados con su banda prohibida de fluorescencia; con este antecedente se desarrolló un modelo para asignar las transiciones interbandas observadas de diferentes nanotubos metálicos, que permitió describir también su estructura electrónica. En la medida en que se conozca mejor la estructura electrónica de las estructuras unidimensionales, éstas se podrán desarrollar como dispositivos ópticos, sensores, etcétera (Strano *et al.*, 2003).

La forma de los puntos cuánticos varía; actualmente las tecnologías de nanofabricación permiten fabricar puntos cuánticos semiconductores, en forma de discos regulares, en los cuales los electrones están tridimensionalmente confinados, con preferencia en la dirección vertical. Estos puntos cuánticos presentan propiedades electrónicas —por ejemplo la energía de ionización y el espectro de excitación discreto— que se asemejan a las de los átomos reales (figura 5). Los efectos del confinamiento y la interacción coulombica se vuelven fuertes en los puntos cuánticos cuando el tamaño del punto es comparable a la longitud de onda del electrón y contiene sólo unos cuantos electrones, a diferencia del potencial tridimensional y esféricamente simétrico alrededor de los átomos que origina la estructura en capas 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, ...; el sistema de punto cuántico en forma de disco presenta simetría rotacional, la cual conduce a conjuntos de estados de la partícula degenerados, igualmente espaciados por $\hbar\omega_0$ (la energía del confinamiento parabólico, \hbar es la constante de Planck dividida por 2π y ω_0 es la frecuencia característica de un potencial parabólico). Los estados electrónicos de este punto se llenan sucesivamente por electrones independientes (Tarucha, 1998).

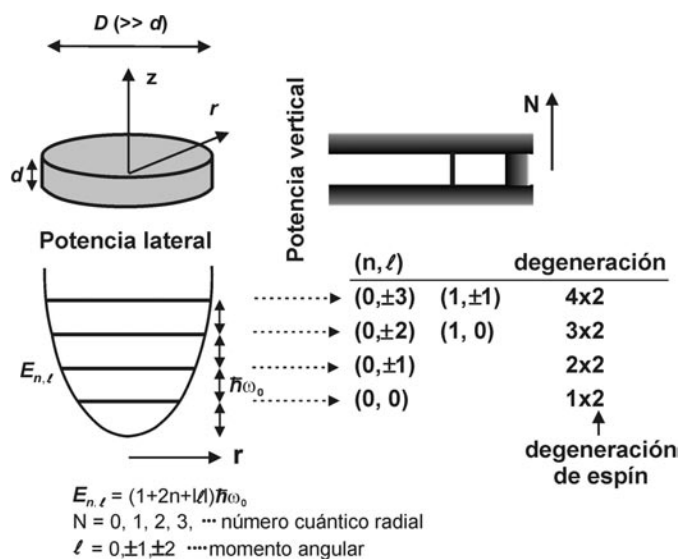


Figura 5. Esquema de un punto cuántico en forma de disco y los estados energéticos de una partícula confinada en el punto, estos estados serán ocupados sucesivamente por electrones. Los estados cuánticos de los respectivos orbitales con energía E_{nl} están representados por (n, l) donde n es el número cuántico radial y l es el momento angular (modificado de Tarucha, 1998).

Obtención de nanomateriales

Numerosas y muy diversas son las rutas preparativas que se han desarrollado para obtener estructuras cuánticas, y abarcan desde la manipulación de átomos individuales, molienda, electrólisis, pirólisis, hasta la síntesis orgánica. Básicamente lo que se busca es lograr tener una mejor distribución de tamaños y un mayor control en la forma de los nanomateriales. Casi siempre en la manera clásica, durante la síntesis de un producto se obtiene al final un equilibrio de fases, por ejemplo en las reacciones químicas en estado sólido. En las rutas preparativas no clásicas, aunque tienen que ser energéticamente posibles, lo que se obtiene es un producto cinético de la ruta y no un material en equilibrio, como en el caso de los materiales compuestos orgánico-inorgánicos hechos por

procesos tales como: deposición capa-por-cap, transporte químico en fase vapor o ablación láser, lo que significa que el material que se está preparando es confeccionado por el proceso. Por lo mismo, la diversidad de materiales que se pueden fabricar dependen del control que se pueda tener a nivel molecular del proceso que los elabora. Esta alternativa ha contribuido de manera decisiva a la revolución de la nanotecnología –fabricación y ensamble de objetos funcionales de dimensiones nanométricas (Navrotsky, 2003; Schiffrin, 2001). Se conoce como el paradigma de la nanotecnología el desarrollo de una ruta intelectual común, con la cual será posible en el futuro construir, montar o ensamblar cualquier clase de dispositivo o sistema funcional, desde sensores médicos ultrasensibles hasta nanocomputadoras (figura 6) (Lieber, 2003).

Entre las técnicas principales para la preparación de puntos cuánticos están: las técnicas de química coloidal, por crecimiento epitaxial, por fluctuaciones de tamaño en los pozos cuánticos convencionales, la síntesis en fase vapor, la nanofabricación, las técnicas sonoquímicas, los procesos de dispersión pirolítica y otras más (Zunger, 1998; Swihart, 2003; Menzler *et al.*, 2003). Una de las técnicas de síntesis con más aceptación es la denominada de autoensamblaje molecular –ensamble espontáneo de moléculas en agregados estructurados, estables y unidos no covalentemente–, con la posibilidad de preparar estructuras nanométricas no biológicas, en tamaños de 1 a 100 nm. En biología abundan los ejemplos de estas estructuras tan complejas y las proteínas son su mejor exponente (Whitesides, *et al.*, 1991). Existen varias líneas de investigación orientadas a la síntesis y caracterización de moléculas gigantes, macromoléculas, similares en tamaño y complejidad a las estructuras biológicas.

A continuación se describen algunas rutas con mayor aplicación:

Técnicas de química coloidal. Estas técnicas se encuentran en continuo desarrollo, por la versatilidad de sus aplicaciones; una de ellas y quizá la de mayor importancia es la formación de partículas semiconductoras en tamaños nanoscalares. Algunas de las ventajas de las rutas de preparación por técnicas de química coloidal son: (1) Se pueden producir grandes cantidades de nanocristales monodispersos que actúan como dominios estructurales independientes; (2) la facilidad de modular el tamaño; (3) la presencia de las moléculas orgánicas sobre la superficie de un nanocristal –surfactante– permite extensa manipulación química después de la síntesis; (4) los nanocristales pueden prepararse a temperaturas relativamente bajas, y (5) están libres de tensiones. Estructuralmente, los nanocristales están en el punto de intersección entre las moléculas –en el cual el número y la localización de cada átomo puede ser exactamente especificado– y el material en bulto –en gran cantidad–, el cual

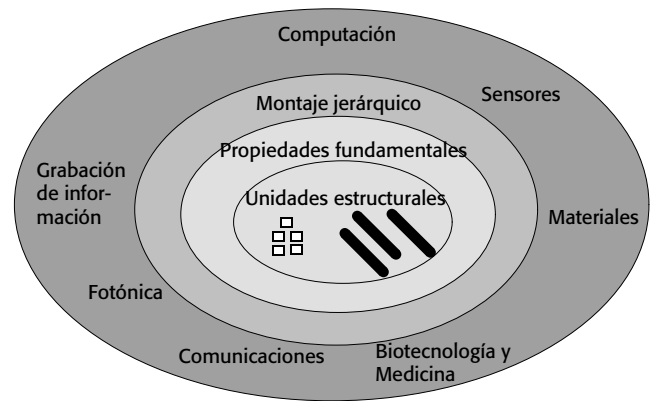


Figura 6. Panorama del paradigma de la nanotecnología: construcción o montaje desde sus unidades estructurales (modificado de Lieber, 2003).

requiere descripciones estadísticas (Alivisatos, 1998).

Un esquema general de la producción de un coloide magnético se muestra en la figura 7. La preparación de nanopartículas monodispersadas de metales de transición 3d

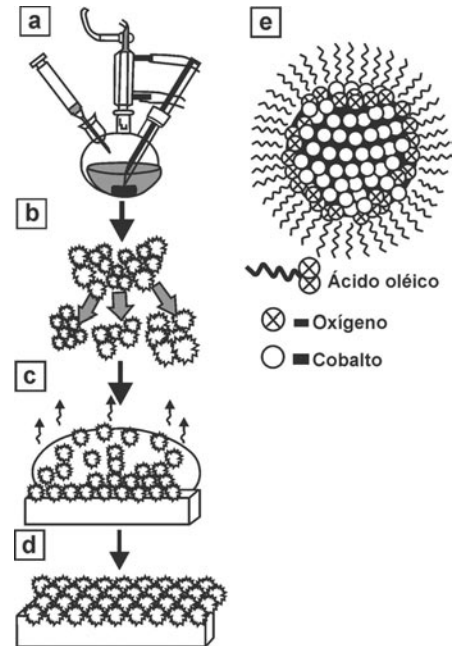


Figura 7. Diagrama de las etapas de la síntesis de nanopartículas: (a) síntesis de nanopartículas en solución y con calentamiento; (b) precipitación con selección de tamaño, para restringir las distribuciones de tamaño en la muestra de nanopartículas; (c) autoensamblaje de dispersiones de nanopartículas; (d) formación de arreglos ordenados de nanopartículas (superredes), y (e) Modelo de una nanopartícula con su núcleo metálico de empaquetamiento compacto, superficie oxidada y una monocapa de surfactante (ácido oleico) (modificado de Murray, *et al.*, 2001).

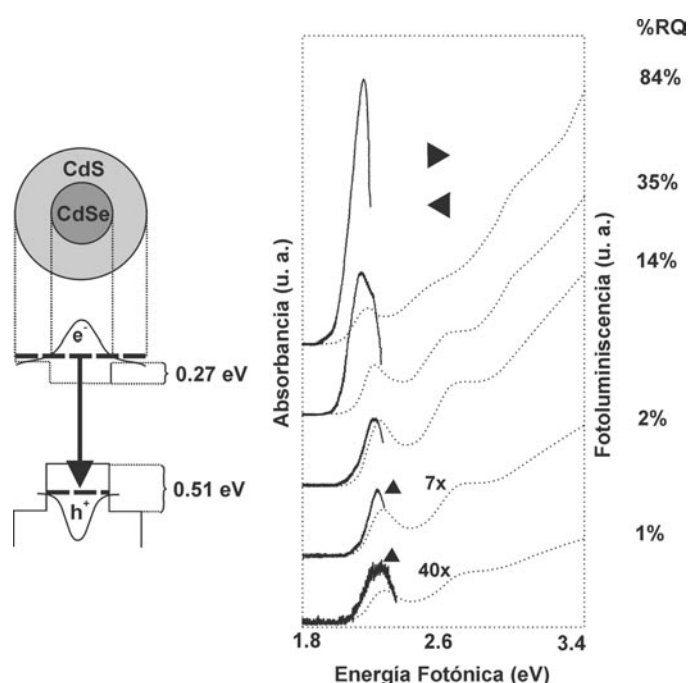


Figura 8. Un nanocrystal de CdS @ CdSe, de 5 nm. El sistema exhibe un rendimiento cuántico de luminiscencia de 80% a temperatura ambiente (modificado de Alivisatos, 1998).

se basa en producir un evento único de nucleación seguido de un crecimiento lento sobre el núcleo formado. Esto se logra por la inyección de un agente reductor en una solución caliente de precursores metálicos y surfactantes. El ajuste de la temperatura y la relación de precursores metálicos a surfactante controla el tamaño de las nanopartículas. Los surfactantes se adsorben reversiblemente a la superficie de las nanopartículas, proporcionando una capa orgánica dinámica que ajusta el crecimiento, estabiliza las nanopartículas en solución y limita su oxidación después de la síntesis. De este modo se obtuvieron nanocristales de Co, Ni y Fe de 9 nm en promedio, con más o menos una capa atómica de diferencia, que bajo condiciones controladas se pueden autoensamblar y formar películas en dos dimensiones, ferrofluidos etcétera (Murray *et al.*, 2001). Las técnicas coloidales han sido perfeccionadas especialmente para sistemas iónicos II-VI

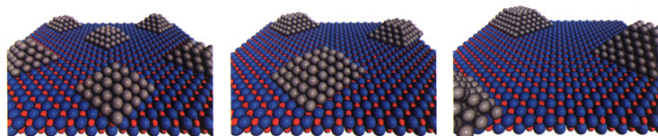


Figura 9. Evolución del crecimiento de las nanopartículas de Pd sobre MgO (100) a 650 K. (izquierda) 1 nm, (centro) 2 nm, (derecha) 3 nm (Thornton, 2003).

(CdS, CdSe) y para semiconductores III-V (InP, GaP, InAs). Se producen con una excelente uniformidad de tamaño, de forma casi esférica, por lo que permiten los estudios espectroscópicos de alta resolución. Es posible sustituir la capa orgánica –surfactante– de pasivación (que neutraliza los enlaces no compensados de la superficie) alrededor de los puntos por semiconductores inorgánicos como en CdS @ CdSe [simboliza que el CdS forma una capa epitaxial completa alrededor de CdSe (Mulvaney, 2001)] y se les denomina puntos núcleo-encapsulados (*core-shell dots*) donde la capa de CdS también está cubierta de surfactante, de manera que la pasivación y el procesamiento químico se cumplen simultáneamente. Este sistema exhibe un rendimiento cuántico de luminiscencia de 80% a temperatura ambiente. En la figura 8 se presenta un nanocrystal o punto cuántico de CdS @ CdSe, de 5 nm aproximadamente de diámetro y una energía de confinamiento de 0.27 eV para el electrón y de 0.51 eV para el hueco correspondiente (Alivisatos, 1998).

Crecimiento epitaxial. Cuando una película de material A crece sobre un sustrato hecho de material B produce islas de A, con tal que A y B sean diferentes en tamaños atómicos, para poder formar pares A/B. Por ejemplo, los pares InAs/GaAs y InP/GaInP. La estructura electrónica de esos puntos cuánticos se controla no sólo por los efectos del tamaño, sino también por la tensión. Las formas de estos puntos son controversiales. Comienzan como pirámides, o pirámides truncadas, como islas, y hay una relación directa entre el tamaño de la isla y su composición. Técnicas de microscopía electrónica permiten caracterizar la forma y el tamaño de las nanopartículas. En la figura 9 se puede observar el crecimiento de las nanopartículas del par Pd/Mgo (Thornton, 2003).

La fluctuación de tamaño en los pozos cuánticos rompe la periodicidad en las dos direcciones extendidas, originando la formación de un punto cuántico. La forma y el tamaño no se controlan fácilmente, pero la calidad interfacial es tan buena que es posible observar características espectroscópicas extremadamente finas. De hecho, muchos de los recientes avances en “espectroscopía de un punto individual” (nano-resonancia magnética nuclear o nanofotoluminiscencia) se han realizado en este tipo de puntos.

La nanofabricación de puntos cuánticos es ideal para el estudio de propiedades de transporte, tales como la observación de la transferencia de electrones uno-por-uno dentro de los puntos cuánticos. Esto revela una secuencia de transiciones, a semejanza de la física atómica en las reglas de selección (por ejemplo de Hund) pero a una escala de energía de meV, en vez de ~10 eV (Zunger, 1998). La demanda de materiales funcionales complejos es mayor cada día y su fabricación se dificulta por el número de parámetros que se deben combinar y controlar para alcanzar una calidad óptima en la

funcionalidad propuesta. Para comprender y optimar estos nuevos materiales se desarrolló un método de síntesis combinatorial y un análisis rápido de las posibles combinaciones de parámetros, aplicado a la síntesis de nanocristales compuestos II-VI, en este caso, iones de Cd y Se implantados en SiO_2 , con propiedades fotoluminiscentes (Großhans *et al.*, 2003).

Otras técnicas actuales para la obtención de nanomateriales son:

Molienda. Entre las técnicas de procesamiento disponibles actuales para sintetizar materiales nanocristalinos en gran cantidad se encuentra la molienda en molino de bolas. Se sabe que el tamaño de grano disminuye con el tiempo de molienda, alcanzando un tamaño de grano mínimo, d_{\min} , que es característico de cada metal. Se diseñó un modelo de dislocación que predice el valor de d_{\min} , para explicar varias de las observaciones de las características de este valor (Mohamed, 2003).

Disolución. Una ruta de síntesis que permite la producción de nanotubos, nanobarras y esferas huecas de Bi_2S_3 es la ruta del disolventetérmico (*solventothermal route*), con el uso de autoclave (Pan *et al.*, 2002).

Pirólisis. Para la obtención de nanotubos de carbono, se utiliza el método de pirólisis de hidrocarburos, que consiste en calentar un hidrocarburo —acetileno, benceno, naftaleno...— en la presencia de un metal de transición (Fe, Co, Ni) que actúa como catalizador. En la figura 10 se muestra un esquema de este método (Terrones, 2003).

Caracterización de puntos cuánticos

Los fenómenos nanoescalares se pueden reconocer de una manera muy general cuando se presenta un confinamiento cuántico, un cambio en la estructura de la banda, un cambio en la frecuencia de absorción o bien un punto de fusión con un valor menor al del material en bulto. En la medida que las rutas preparativas avanzan y se diversifican para obtener distintos nanomateriales, ha sido necesario desarrollar técnicas experimentales efectivas que permitan la caracterización de propiedades estructurales, electrónicas, ópticas, magnéticas y otras con resolución espacial en la escala nanométrica. Estos estudios tienen gran importancia desde las perspectivas científica y tecnológica.

Dos técnicas son particularmente valiosas: la microscopía electrónica y la microscopía de tunelaje con barrido (y las técnicas que se derivan de ésta, como la microscopía de fuerza atómica, la espectroscopía de tunelaje con barrido, la espectroscopía de tunelaje con barrido de spin polarizado, la microscopía de fuerza magnética, etcétera) para el estudio básico de superficies (Yu *et al.*, 1997). En la figura 11 se observa la imagen de una nanopartícula de ZnO sintetizada en una dispersión coloidal de DMSO —dimetil sulfóxido—, aquí

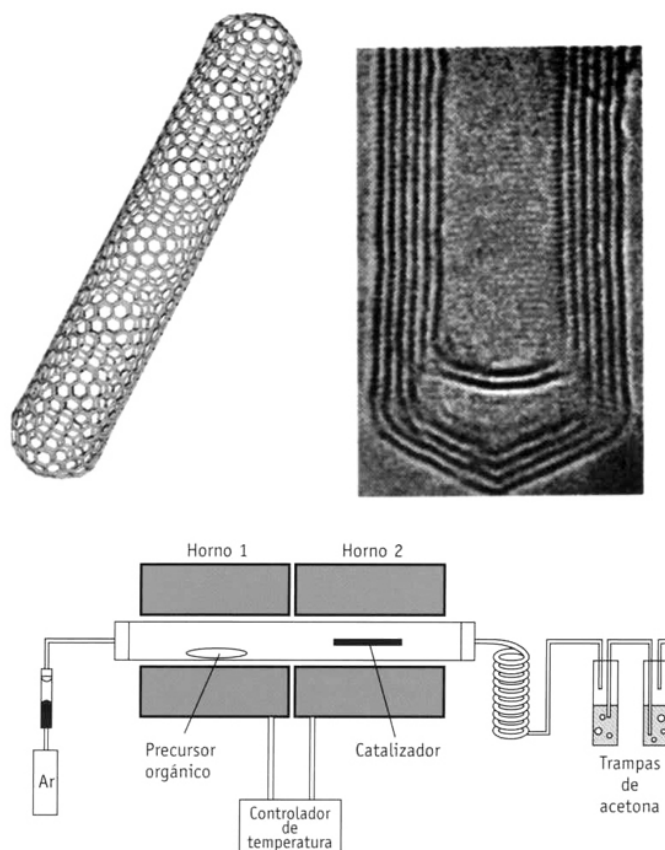


Figura 10. Nanotubos de carbono. (a) Modelo molecular de un nanotubo de carbono cerrado. (b) Micrografía de transmisión de alta resolución de un nanotubo de carbono de seis capas. (c) Esquema del método de producción de nanotubos utilizando la pirólisis de hidrocarburos. (Modificado de Terrones, 2003).

en la Facultad de Química de la UNAM por el grupo del doctor Díaz (Rodríguez-Gattorno *et al.*, 2003).

En las micrografías de la figura 12 se distinguen cuatro inclusiones de Pb con ciertos “tamaños mágicos” —forma de equilibrio y tamaños preferidos debido al mínimo de energía residual de deformación— (Dahmen *et al.*, 1997). Otra técnica muy utilizada para el seguimiento de las reacciones e identificación de productos es la difracción de rayos X por el método de polvos. En la figura 13 se pueden comparar los difractogramas típicos de tres diferentes puntos cuánticos correspondientes a GaP, InP, y GaInP_2 , en distintos tamaños.

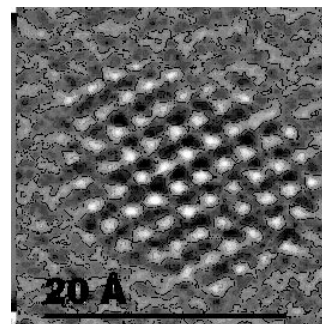


Figura 11. Micrografía de la imagen de una nanopartícula de ZnO sintetizada por dispersión coloidal (Rodríguez-Gattorno, 2003).

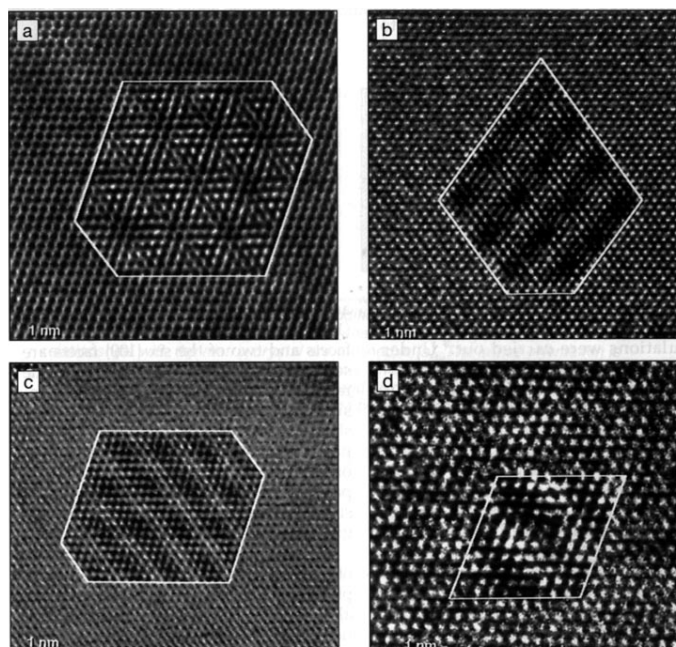


Figura 12. Micrografías de alta resolución de cuatro inclusiones nanométricas de Pb con diferentes tamaños y formas, embebidos en una matriz de Al (Dahmen, 1997).

Propiedades de las nanopartículas

La ciencia de la nucleación es en realidad ciencia en la nanoescala. La naturaleza ha ejercido la nanotecnología desde los inicios del Universo. Dentro de la condensación de la nebulosa solar, las primeras partículas que se formaron probablemente eran nanopartículas de granos de polvo que se nuclearon, condensaron, estuvieron bajo presión y la evolución de los planetas comenzó. La química superficial del planeta tierra involucra procesos nanoescalares. La erosión de las rocas es corrosión a nivel nanométrico. En el ciclo geoquímico está implícita la reacción de las nanopartículas para convertir las rocas erosionadas en suelos, sedimentos y partículas de polvo. El suelo es un material extremadamente complejo, es una mezcla de materiales de diferentes tamaños, orgánicos, inorgánicos y biológicos, donde el transporte de nutrientes, contaminantes y metales pesados se realiza en las nanopartículas. En ciencias de la atmósfera uno de los intereses son las nanopartículas, como polvos o en la nucleación de nubes. Cualquier reacción inicial en estado sólido o en fase condensada se inicia en un punto con unos cuantos átomos y el rompimiento de algunos enlaces; esto podría ser el comienzo de un terremoto de gran extensión.

Para entender el papel que juegan cada uno de los diferentes nanomateriales en todos los procesos mencionados, se deben estudiar sus propiedades químicas, ópticas, magnéticas, eléctricas y electrónicas desde un punto de vista integral (Navrostky, 2003), por lo que el postulado de Fara-

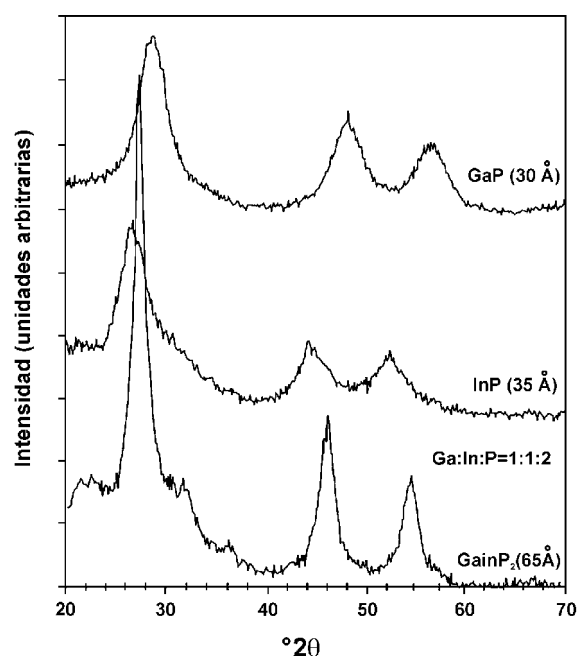


Figura 13. Difractogramas de nanocristales de diferentes tamaños y composiciones (Nozik y Miæiaæ, 1998).

day: “El control del tamaño de un material puede llevar a nuevas propiedades”, continúa siendo la guía primordial, aunque ahora la investigación se extiende a la comprensión del origen de esas propiedades (Liz-Marzán y Norris, 2001).

En los materiales, las energías de las reacciones químicas y de las transiciones de fases son indicativas de las fuerzas interatómicas y de las energías de enlace que hacen posible la unión de átomos y moléculas. Asimismo, las distintas interacciones que existen entre los electrones, y entre iones y electrones, determinan las propiedades químicas y físicas de un material. Las propiedades de las nanopartículas se estudian de manera individual y también cuando se agrupan para formar conglomerados de nanopartículas en contacto directo entre ellas; en este caso se habla de materiales nanoestructurados.

Las propiedades de los materiales nanoestructurados estarán determinadas por las propiedades intrínsecas de las nanopartículas y por la interacción entre ellas (Mendoza 2003), aunque no está totalmente comprendida la química superficial y las diversas interacciones entre partículas. Un ejemplo de un material nanoestructurado son los nanotubos de carbono rellenos de nanoalambres de Fe_3C , con la posibilidad de usarse como partículas ferromagnéticas (Cheng *et al.*, 2003). El hueso se considera que es esencialmente un nanocompuesto de nanocristales de hidroxiapatita y la proteína colágena tipo-1 (Chang *et al.*, 2003).

Los puntos cuánticos, los alambres y nanotubos inorgá-

nicos presentan una variedad importante de propiedades ópticas y eléctricas que dependen fundamentalmente del tamaño y de la forma; estos dos parámetros permiten ejercer el control de muchas de las propiedades físicas y químicas importantes de los materiales nanoescalares: luminiscencia, conductividad, actividad catalítica, estructuras cristalinas diferentes a las de su contraparte en bulto. En el caso del oro, su punto de fusión como nanocrystal de 4 nm baja a 700 K del valor tabulado de 1,337 K para el oro en bulto; los átomos de oro son incoloros y pierden su carácter de metal noble pues se oxidan instantáneamente en el aire (Mendoza, 2003), (Mulvaney, 2001).

Las propiedades más estudiadas en los nanocrystal corresponden a las del espectro óptico. Existe un cambio en el color percibido cuando el cristal es más pequeño que las longitudes de onda de la luz visible que lo iluminan [400 nm violeta (3.10 eV) a 700 nm rojo (1.77eV) ver tabla 1]. Se puede suponer que esto sea un efecto geométrico y que se deba a los cambios en la coherencia de la luz dispersada por la superficie del material. Los metales pierden su lustre metálico y adquieren casi siempre un color café amarillento. Una segunda transición importante es cuando los efectos de superficie comienzan a perturbar la periodicidad de la red “infinita” que constituye el nanocrystal. Estos cambios se conocen como efectos por tamaño cuántico y se presentan en el régimen de tamaño de 1-10 nm. Estos efectos tienen su origen en el tipo de enlace del cristal: en un metal, el tamaño preciso donde aparecen depende de la trayectoria libre media de los electrones (la distancia promedio que recorren libremente los electrones entre colisiones); en un semiconductor el tamaño del régimen estará determinado por la distancia entre un par electrón-hueco, lo que puede conducir a cambios espectaculares en color y luminiscencia. Por ejemplo, la comparación de los espectros de absorción de una película fina de oro y de oro coloidal de la figura 14 nos sirve para comprender por qué el oro no siempre es color dorado. La película, el oro en bulto, absorbe a través del espectro electromagnético del visible y más aún en el IR, con una leve depresión alrededor de 400-500 nm (una película gruesa no es transparente y el color observado se debería sólo a la luz reflejada). El oro coloidal exhibe una total transparencia a longitudes de onda grandes que termina abruptamente en una banda intensa, estrecha y afilada alrededor de 520 nm (2.3 eV). La transparencia resultante entre ~560 nm y 700 nm causa que la luz transmitida se vea de color rojo rubí —color de los objetos de vidrio rojo con oro coloidal—. Este cambio tan drástico en el color se debe al cambio en la dinámica de la conducción de los electrones. Los electrones de las partículas nanométricas se mueven en fase, generando un dipolo gigante bajo la influencia de la radiación incidente. Este movimiento electrónico lleva a la generación de cargas

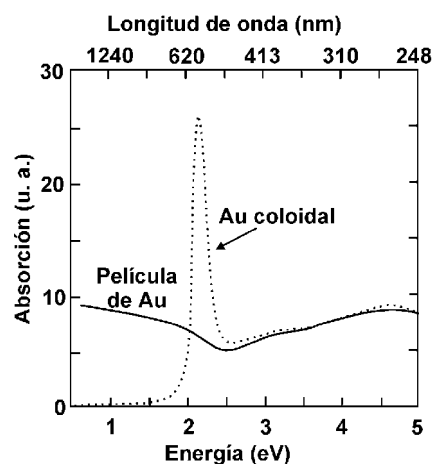


Figura 14. Espectro de absorción de una película de oro coloidal nanocrystalino, y de una película metálica de oro, en bulto, de grosor equivalente (Mulvaney, 2001).

de polarización superficiales en ambos lados de la nanopartícula, el cual actúa como una fuerza restauradora sobre los electrones de conducción, y esto conduce a una frecuencia de resonancia en el espectro de absorción. A la banda intensa en 520 nm se le denomina “banda de absorción plasmónica superficial”; un plasmón es una onda electrónica colectiva (Mulvaney, 2001; Kittel, 1993).

Es motivo de investigación intensa tratar de explicar el origen del cambio en las propiedades de los materiales cuando sus tamaños se reducen a la escala nanométrica. Muchos de los modelos que se tienen para explicar la conducta de los nanomateriales son modelos macrométricos. Ciertamente los cálculos cuánticos *ab initio* son aplicables sólo a nanomateriales sencillos. Pero la pregunta sería si es posible seguir haciendo predicciones en nanomateriales al aplicar las reglas de Pauling, conceptos de ionicidad, enlace valencia y otros, correspondientes a las fases en bulto. (Navrosky, 2003).

La experimentación está avanzando a pasos agigantados; así, a las dos formas macrométricas del carbono (el grafito —muy blando y conductor de la electricidad— y el diamante —muy duro y aislante—) hay que añadir, hasta ahora, 20 formas nanoescalares de carbono. Basta mencionar que sólo el estudio de nanotubos de carbono —100 veces más resistentes que el acero y seis veces más ligeros— ha arrojado aplicaciones tan insospechadas como su utilización en el almacenamiento de gases —donde el hidrógeno se perfila como el combustible del futuro—, para encapsular materiales de grabación magnética, sensores potenciales de gases peligrosos, etcétera (Terrones, 2003), y ha abierto un universo de investigación, pues desde el descubrimiento de los nanotubos de carbono por Iijima en 1980 (Iijima, 1980;

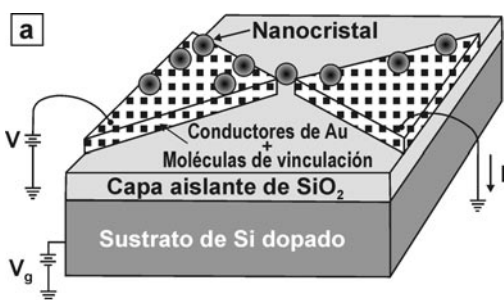


Figura 15. Esquema idealizado de un transistor con un nanocrystal de CdSe como su elemento activo (Alivisatos, 1998).

Iijima, 1996) y del conocimiento de las propiedades electrónicas y mecánicas de la pared interna del nanotubo se han multiplicado sus aplicaciones en dispositivos como diodos nanoescalares, transistores, puntas del microscopio de fuerza atómica, nanopinzas y componentes de nanointerruptores eléctricos; ahora se están considerando para nanomáquinas como el nanotaladro que pueda ser utilizado para modificaciones de superficies en tamaños nanométricos (Yu y Pennycook, 2003). Una variedad son los nanotubos de nitruro de boro, sintetizados por primera vez en 1995, rivalizan con los nanotubos de carbono en propiedades mecánicas, pero además presentan propiedades semiconductoras ($E_g = 5.5$ eV) (Bae *et al.*, 2003).

En el estudio de la interacción entre la teoría y la experimentación, acerca de las nanopartículas, algunas de las investigaciones más recientes son:

El desarrollo de un método para explicar la dependencia del tamaño de la nanopartícula de la energía de formación de vacantes—energía necesaria para formar una vacante en el material—de nanopartículas metálicas, teniendo en cuenta la energía superficial, el radio atómico y el coeficiente de rigidez (o módulo de corte) del material en bulto correspondiente. Este método se aplicó a las nanopartículas de oro y los cálculos muestran que la energía de formación de

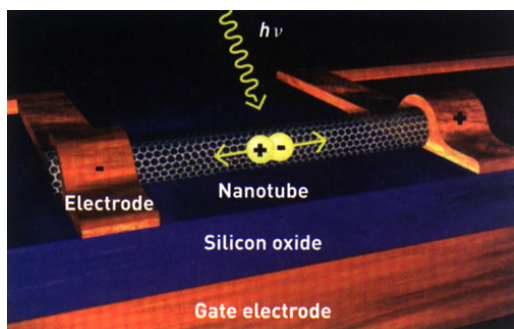


Figura 16. Un fotodetector nanoescalar. En este dispositivo, el haz de luz brillante sobre un nanotubo de carbono que está conectado a un transistor genera un corriente notable (modificado de Freitag *et al.*, 2003).

vacantes disminuye con la disminución del tamaño de la partícula, lo cual cualitativamente está acorde con la variación del punto de fusión de las nanopartículas de oro (Qi y Wang, 2003). Un campo muy activo es la investigación de las propiedades mecánicas, entre ellas el análisis molecular de los efectos de la temperatura en las mediciones de la nanoindentación—pruebas de dureza a nivel nanoescalar—(Fang, 2003). Se observó experimentalmente en los nanocrystal de α -Fe₂O₃, MgO, TiC, MnF₂, ZrO₂, CeO_{2-x}, y BaTiO₃ que a mayor disminución del tamaño de partícula, hay mayor aumento en el parámetro de red. Para explicarlo se realizó el cálculo teórico de la expansión de red de la celda unitaria para los nanocrystal de MgO, α -Fe₂O₃ y TiC como una función del tamaño de partícula mediante un método estadístico; este cálculo resultó satisfactorio (Fukuhara, 2003). Las mediciones de las propiedades eléctricas realizadas en un solo nanocrystal demuestran que el potencial químico puede ser modulado. En la figura 15 se tiene un esquema idealizado de un dispositivo de nanocrystal de CdSe de 5.5 nm de diámetro con moléculas orgánicas como estabilizadoras, embebidos en dos conductores de oro adheridos a un *wafer*—disco delgado—de silicio dopado, el cual se utiliza como compuerta electrónica para modular el potencial químico del nanocrystal que se está estudiando (Alivisatos, 1998). Se comprobó experimentalmente que es posible modular finamente el campo electromagnético que rodea a las nanopartículas al variar el tamaño del núcleo y la capa externa de nanocápsula metálica; la prueba se realizó en una serie de núcleos de sílice de 65 a 79 nm cubiertos con capas de plata con grosores de 5 a 20 nm. Las aplicaciones de esta tecnología serían en biosensores, ciencias ambientales, química, entre otros (Jackson *et al.*, 2003). Se desarrolló un procedimiento de un solo paso para construir láseres de inyección basados en nanoalambres de CdS y un novedoso esquema de inyección de carga. Estos sistemas emiten una luz intensa en el visible, y se espera poder aplicarlos en dispositivos ópticos. (Duan *et al.*, 2003). Se está experimentando para encontrar la forma de controlar la luz y la corriente eléctrica en un solo nanotubo de carbono, con el fin de construir un diminuto dispositivo optoelectrónico—acoplamiento de bloques funcionales electrónicos mediante haces de luz—, figura 16. De lograrse esto, sería un hito en la historia (Freitag *et al.*, 2003).

Las biomoléculas, o estructuras biomoleculares, como las proteínas—moléculas nanométricas—despliegan una gran variedad de usos: sirven a los organismos como interruptores ultrarrápidos, cámaras de reacción química, baterías, identificadoras de patrones (o modelos de estructuras), almacenes de datos, etcétera. Ostentan la gran ventaja de que se pueden autoensamblar; por ello, si se logra construir la interfaz entre la molécula biológica y los componentes electrónicos, se

pueden encontrar usos como mejores computadoras, herramientas de diagnóstico médico, sensores químicos, etcétera.

Una aplicación interesante de las biomoléculas se cita a continuación. Entre los iones metálicos más estudiados se encuentra el Pb(II), debido a los efectos nocivos que tiene en la salud, especialmente en los niños. Una fuente importante de plomo son las pinturas emplomadas de las casas antiguas. Se desarrolló un sensor colorimétrico de metales que se basa en el uso de nanopartículas de oro-DNA-activadas para la detección de DNA. Este sensor tiene muy alta sensibilidad y selectividad para el plomo, además lo cuantifica de acuerdo con los requerimientos definidos por la Oficina de Protección al Ambiente (Environment and Protection Agency, EPA) (Liu y Lu, 2003).

Comentarios acerca del comercio de los nanomateriales

Gran parte de los estudios que se realizan en los centros de investigación científica, gubernamentales y privados, en el área de nanomateriales, no han sido trasladados a la industria para su comercialización. El Consorcio en Nanotecnología de New Jersey (New Jersey Nanotechnology Consortium) comenzó a operar este año con un presupuesto anual de 12 millones de dólares, teniendo como objetivo principal el servir como eslabón entre la investigación y los productos comerciales (Thayer, 2003). En Europa se están haciendo esfuerzos similares, como la construcción del Centro de Nanotecnología Multidisciplinario (Multidisciplinary Nanotechnology Center), en Gales, GB, con el propósito de tratar de reunir a todos aquellos que trabajan en nanotecnología, para que interactúen de manera constante y creciente, esto tendrá un costo aproximado de £1.75 millones.

En cuanto a la inversión del capital, lo siguientes ejemplos nos darán una idea: aunque en la industria de los catalizadores se ha trabajado en tamaños nanométricos desde hace más de 40 años, en el simposio “Nanotecnología en catálisis” celebrado en Boston, durante 2002, se hizo hincapié en la importancia de la investigación en procesos catalíticos enfocados hacia la nanotecnología. El propósito es diseñar catalizadores con ciertas características a nivel nanométrico, propiedades electrónicas, composición local específica y otras. Se estima que en el mundo, a través de procesos catalíticos, anualmente se producen productos químicos y materiales con valor aproximado de 10 trillones de dólares; la optimización de un porcentaje mínimo puede llevar a un tremendo aumento en la eficiencia (Jacoby, 2002). Las ventas globales de TiO₂ anualmente exceden los 8 millardos (10⁹) de libras por año, 60% de los cuales se destina a pinturas y esmaltes. Los nuevos métodos de producción permiten la obtención de TiO₂ en el intervalo de tamaños de 10 a 20 nm; estas nanopartículas permiten el paso de la luz visible pero

dispersan y reflejan la radiación UV; este producto ya se está incorporando a muchos artículos de uso personal —bloqueadores solares y cosméticos, por ejemplo— y se estima un mercado potencial de 25 millones de libras por año. Además, aprovechando sus propiedades fotocatalíticas, se estudian sus posibles aplicaciones en otras áreas (Reisch, 2003). Con el propósito de asegurar que los avances técnicos y los productos de la nanotecnología esperados para las próximas décadas sean producidos con calidad y confiabilidad, es necesario disponer de mediciones exactas. Por ejemplo, al reducir las dimensiones de los sistemas microelectromecánicos (*Microelectromechanic Systems*, MEMS) paralelamente está en desarrollo la infraestructura de una nanometrología dimensional exacta, especialmente cuando los dispositivos se apliquen en situaciones críticas, por ejemplo en salud (Leach *et al.*, 2002). En el mundo moderno es indispensable evaluar los materiales para su producción, no sólo en los aspectos técnicos sino también en los económicos, como el análisis de incertidumbre, de impacto ambiental o la evaluación de riesgos; éstos y otros más deben formar parte habitual de cualquier proyecto de desarrollo, en particular de aquellos relacionados con la nanotecnología.

Algo acerca de la educación

¿Para pensar en pequeño es necesario una formación especial? Un problema real es la contaminación atmosférica; para entender el destino y el transporte de las nanopartículas en la atmósfera es necesario comprender sus orígenes químicos, sus propiedades aerodinámicas, la meteorología de su ambiente, sus transformaciones químicas, su adhesión, su coalescencia —agrupamiento— y su interacción con los organismos. Cada uno de estos rubros es un campo *per se*. ¿Cómo se debe formar, educar al estudiante que desea trabajar en nanopartículas?, ¿qué se necesita para triunfar en los campos de la nanociencia y de la nanotecnología? En éste, como en cualquier otro campo, lo que verdaderamente se necesita en la educación superior es enseñar los fundamentos, impulsar el pensamiento crítico, mejorar las habilidades del lenguaje y la comunicación profunda entre nosotros mismos, alumnos y maestros, industria y academia (Navrotsky, 2003). Estas palabras tienen un acento muy especial en el contexto actual de la globalización, donde la manufactura y la maquila van dejando de ser la base económica de un país, para dar paso a la venta de los servicios intelectuales; no hay necesidad de vender materias primas para ser un país desarrollado.

Consideraciones acerca de la salud y la ecología

La lección del agujero de ozono no ha sido cabalmente aprendida ni aplicada. Apenas se está despertando el interés profundo para descontaminar y evitar la degradación del medio ambiente, además de reconocer la enorme inversión

en costo y en tiempo que será necesaria para limpiarlo. La contaminación actual se puede atribuir al manejo de grandes volúmenes de materias primas en los procesos de manufactura. En la manera en que son producidos y utilizados los nuevos materiales se espera que deberían ser más ecológicamente eficientes, en el sentido de permitir un reciclaje más fácil y con una reducción del uso de los recursos naturales. Una preocupación inmediata es explicar la interacción de nanomateriales con los organismos y los ecosistemas: no existen suficientes datos para juzgar su toxicidad y muy probablemente no todos van a ser biológicamente inertes. La diversidad de nanomateriales es tan grande que no va a haber una respuesta única para todos estos sistemas. Por ejemplo A. P. Alivisatos (2002), informó que los puntos cuánticos semiconductores de CdS @ SiO₂ se incorporan dentro de células eucarióticas sin ningún efecto adverso obvio. Estos puntos cuánticos son del mismo tamaño que una proteína y fluorescen intensamente por periodos largos, en colores. Estos puntos se utilizan para marcar a las células, estudiar sus movimientos y juzgar su potencial extensión por metástasis (como cáncer) de una parte a otra del cuerpo. Aunque CdS es tóxico en forma masiva, la aparente inocuidad de los puntos de CdS se debe parcialmente a su cubierta de sílice. Pero este es un caso aislado. Las nanopartículas se encuentran en las atmósferas urbanas, se producen de manera continua en los procesos a altas temperaturas, como en los automóviles, los hornos cerámicos, de cemento, de refractarios, de aceros, etcétera. Los estudios en estos particulados están bien establecidos y sus niveles de peligrosidad determinados, aunque no existe un control completo sobre ellos (Dagani, 2003).

Perspectivas

La nanotecnología ofrece expectativas muy amplias en avances médicos, materiales más inteligentes y más ligeros, sistemas energéticos más limpios, dispositivos electrónicos más rápidos y eficientes, materiales avanzados que sean más inteligentes y multifuncionales, como mayor adaptabilidad, autorregulación, autodiagnóstico y autorreparación. Hasta fines del siglo pasado las propiedades requeridas en los materiales eran la resistencia, la dureza, sus conductas eléctrica y magnética, para producirlos en gran escala; ahora los efectos de la reducción de tamaño originan dos grandes retos: primero, cómo caracterizar adecuadamente las nanopartículas, y segundo, cómo utilizar sus propiedades nuevas —por ejemplo almacenar información, diferentes propiedades ópticas— para crear objetos macrométricos a partir de unidades estructurales nanoescalares. Para desarrollar estos nuevos materiales es necesario la combinación de esfuerzos en investigación de diversas disciplinas: química de materiales, ciencia e ingeniería de materiales, ingenierías genética y

de tejidos, química orgánica, bioquímica, nanofabricación, tecnologías avanzadas de la información, etcétera, especialmente en el caso de la nanotecnología. Si el alcance de la nanotecnología se puede apreciar por el número de revistas donde se publican artículos relacionados, como un reflejo de los grupos científicos que están trabajando en el tema, entonces verdaderamente es abrumador, porque aparte de las revistas especializadas en el tema, casi todas las demás en algún momento incluyen temas relacionados con asuntos en la escala de nanometros.

El Premio Nobel Richard E. Smalley opina que el problema número uno que enfrentará la humanidad en los próximos 50 años será el de encontrar fuentes alternas de energía, pues para entonces habrá de 8 a 10 billardos (10⁹) de habitantes en el mundo que requerirán 30 a 60 terawatts (10¹²) de energía diarios. Él cree que la revolución de la nanotecnología facilitará el uso de fuentes alternas: fotoconversión directa de luz y agua para producir hidrógeno, nuevas celdas de combustible, mejor almacenamiento de hidrógeno, nuevas y mejores baterías, y cables construidos de superconductores o conductores cuánticos (Schulz, 2003). La nanotecnología crece a pasos agigantados, y se incorpora como asunto de prioridad estratégica económica y militar en los países desarrollados, como se puede apreciar de la reciente aprobación de un gasto aproximado de 2.4 billardos (10⁹) de dólares para los próximos tres años en la Unión Americana, comparado con los 324 millones de dólares aprobados en el año 2000. Las inversiones correspondientes en Japón (210), Alemania (75.6), Reino Unido (46.8) y Francia (22.8) en millones de dólares, del año 2000, también son significativas (Editorial MRS, 2003). La nanotecnología incursiona en la vida cotidiana en los ingredientes de cosméticos, equipo electrónico, las películas de ficción científica, en los microprocesadores de localización a los autotransportes, los perros y... ¿a los seres humanos? Ciertamente, el catalizador para una futura revolución industrial y cultural que lleve a grandes mejorías en la calidad de vida al ofrecer una fabulosa variedad de aplicaciones, es la nanotecnología.

Y como muy bien lo expresó Richard Feynman: “Hay mucho espacio en el fondo”.

Referencias

- Alivisatos, A. P., Electrical Studies of Semiconductor-Nanocrystal Colloids, *MRS Bull.*, **23** [2], 18-23, 1998.
- Alivisatos, A. P., *Adv. Mater.*, **14**, 882, 2002.
- Appenzeller, T., The Man Who Dared to Think Small, *Science*, **254**, 1300-1301, 1991.
- Bae, S. Y., Seo, H. W., Park, J., Choi, Y. S., Park J. C., and S. Y. Lee, Boron nitride nanotubes synthesized in the temperature range 1000-1200, *Chem. Phys. Lett.*, **374** [5-6], 534-541, 2003.
- Chang, M. C., Ching-Chang Ko y Douglas, W. H., Conformational change

- of hydroxyapatite/gelatin nanocomposite by glutaraldehyde, *Biomaterials*, **24**[18], 3087-3094, 2003.
- Cheng, J., Zhang, X., Liu, F., Tu, J., Ye, Y., Ji, Y. y Chen, C., Synthesis of carbon nanotubes filled with Fe₃C nanowires by CVD with titanate modified palygorskite as catalyst, *Carbon*, **41** [10], 1965-1970, 2003.
- Convocatoria de Simposia en Materiales Nanométricos, Materials Research Society, 2003 MRS Fall Meeting, Boston, MA, USA.
- Corcoran, E., Diminishing Dimensions, *Sci. Am.*, **263** [5], 75-78, 1990.
- Crawford, R., Japan Starts a Big Push Toward the Small Scale, *Science*, **254**, 1304-1305, 1991.
- Dagani, R., Nanomaterials: Safe or Unsafe?, *Chem. Eng. News*, **81**[17], [2], 30-33, 2003.
- Dahmen, U., Jonson, E., Xiao, S. Q., and Johansen, A., High-Resolution Electron-Microscopy Investigation of Nanosize Inclusions, *MRS Bull.*, **22** [8], 49-52, 1997.
- Duan, X., Huang, Y., Agarwal, R. y Lieber, C. M., Single-nanowire electrically driven lasers, *Nature*, **421** [6920], 241-245, 2003.
- Editoriales, *MRS Bull.*, **28** [7], 476-477, 2003.
- Fang, T., Weng, C. y Chang, J., Molecular dynamics analysis of temperature effects on nanoindentation measurement, *Mater. Sci. Eng.*, **A 325**, [1-2], 7-12, 2003.
- Freitag, M., Martin, Y., Misewich, J. A., Martel, R., and Avouris, Ph., Photoconductivity of Single Carbon Nanotubes, *Nano Lett.*, **3** [8], 1067-1071, 2003.
- Fukuhara, M., Lattice expansion of nanoscale compound particles, *Phys. Lett.* **A 313**, 427-430, 2003.
- Großhans I., Karl H., y Stritzker, B., Advanced apparatus for combinatorial synthesis of buried II-VI nanocrystals by ion implantation, *Mater. Sci. Eng.*, **B 101**, [1-3] 212-215, 2003.
- Iijima, S., *J. Cryst. Growth*, **50**, 675, 1980.
- Iijima, S., *Nature*, **354**, 56, 1991.
- Jackson, J. B., Westcott, S. L., Hirsch, L. R., West, J. L. y Halas, N. J., Controlling the surface Raman effect via the nanoshell geometry, *Appl. Phys. Lett.*, **82** [2], 257-259, 2003.
- Jacoby, M., Nanosized Catalysts, *Chem. Eng. News*, **80** [37], 30-32, 2002.
- Kittel, C., *Introducción a la física del estado sólido*, Trad. por J. Aguilar, Reverté, México, 1993, p. 283.
- Leach, R. K., Blunt, L., Chetwynd, D. G., y Yacoot, A., Nanoscience Advances in the UK in Support of Nanotechnology, *Int. J. Nanosci.*, **1** [2], 123-138, 2002.
- Lieber, C. M., Nanoscale Science and Technology: Building a Big Future from Small Things, *MRS Bull.*, **28** [7], 486-491, 2003.
- Liu, J. y Lu, Y., A Colorimetric Lead Biosensor Using DNAzyme-Directed Assembly of Gold Nanoparticles, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 6642-6643, 2003.
- Liz-Marzán, L. M. and Norris, D. J., New Aspects of Nanocrystal Research, *MRS Bull.*, **26** [12], 981-982, 2001.
- Maenosono S., Modeling photoinduced fluorescence enhancement in semiconductor nanocrystal arrays, *Chem. Phys. Lett.*, **376** [5-6], 666-670, 2003.
- Mendoza L., D., Nanomateriales: nuevas propiedades a menores dimensiones, *Ciencia*, **54** [1], 23-29, 2003.
- Menzler, N. H., Lavergnat D., Tietz, F., Sominski, E., Djurado, E., Fischer, W., Pang, G., Gedanken, A. y Buchkremer, H. P., Materials synthesis and characterization of 8YSZ nanomaterials for the fabrication of electrolyte membranes in solid oxide fuel cells, *Ceram. Int.*, **29** [6], 619-628, 2003.
- Mohamed, F. A., A Dislocation Model for the Minimum Grain Size Obtainable by Milling, *Acta Mater.*, **51** [14], 4107-4119, 2003.
- Moliner, M., *Diccionario de uso del español*, Tomo II, Ed. Gredos, Madrid, 1992, p. 489.
- Mulvaney, P., Not All That's Gold Does Glitter, *MRS Bull.*, **26** [12], 1009-1014, 2001.
- Murray, C. B., Sun, S., Doyle, H., and Betley, T., Monodisperse 3d Transition-Metal (Co, Ni, Fe) Nanoparticles and Their Assembly into Nanoparticle Supertlattices, *MRS Bull.*, **26** [12], 985-991, 2001.
- Navrotsky, A., Materials and Nanotechnology, *MRS Bull.*, **28**[2], 92-94, 2003.
- Nozik, A. J. y Micic, O. I., Colloidal Quantum Dots of III-V Semiconductors, *MRS Bull.*, **23** [2], 24-30, 1998.
- Pan, D., Zhang, S., Li, G., Chen, Y., y Hou, J. G., Shape Control of Bi₂S₃ Nanoparticles, *Int. J. Nanosci.*, **1** [2], 187-193, 2002.
- Qi, W. H., Wang, M. P., Size dependence of vacancy formation energy of metallic nanoparticles, *Physica*, **B 334**, 432-435, 2003.
- Reisch, M. S., Essential Minerals, *Chem. Eng. News*, **81** [13], 13-14, 2003.
- Rodríguez-Gattorno, G., Santiago-Jacinto, P., Rendón-Vázquez, L., Németh, J., Dékány, I., Díaz, D., Novel Synthesis of ZnO Nanoparticles from the Spontaneous Hydrolysis of Zinc Carboxylate Salts, enviada para su publicación a *J. Phys. Chem. B* en junio de 2003.
- Schiffirin, D. J., Capped Nanoparticles as Potential Electronic Components with Nanoscale Dimensions, *MRS Bull.*, **26**[12], 1015-1019, 2001.
- Schulz, W., Nanotechnology, Enabling New Sources of Energy Production, *Chem. Eng. News*, **81** [24], 9, 2003.
- Strano, M. S., Doorn, S. K., Haroz, E. H., Kittrell, C., Hauge, R. H., y Smalley, R. E., Assignment of (n, m) Raman and Optical Features of Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes, *Nano Lett.*, **3** [8], 1091-1096, 2003.
- Swihart, M. T., Current Opinion, *Colloid and Interface Sci.*, **8** [1], 127-133, 2003.
- Tanaka, K. y Kizuka, T., Time-Resolved High-Resolution Electron Microscopy of Clusters, Surfaces and Interfaces, *MRS Bull.*, **22** [8], 58-61, 1997.
- Tarucha, S., Transport in Quantum Dots: Observation of Atomlike Properties, *MRS Bull.*, **23** [2], 49-53, 1998.
- Terrones, M., La nanotecnología del carbono, *Ciencia*, **54** [1], 31-39, 2003.
- Thayer, A. Nanotech Development Facility Launched in N. J., *Chem. Eng. News*, **24**, 5, 2003.
- Thornton, G., Watching Nanoparticles Grow, *Science*, **300**, 1378-1379, 2003.
- Whitesides, G. M., Mathias, J. P., Seto, C. T., Molecular Self-Assembly and Nanochemistry: A Chemical Strategy for the Synthesis of Nanostructures, *Science*, **254**, 1312-1319, 1991.
- Yu, E. T., and Pennycook, S.J., Nanoscale Characterization of Materials, *MRS Bull.*, **22** [8], 17-18, 1997.
- Yu, E. Lozovik, Minogin, A. V., and Popov, A. M., Nanomachines based on carbon nanotubes, *Phys. Lett.*, **A 313**, 112-121, 2003.
- Zunger, A., Electronic-Structure Theory of semiconductor Quantum Dots, *MRS Bull.*, **23** [2], 35-42, 1998.
- Zunger, A., Semiconductor Quantum Dots, *MRS Bull.*, **23** [2], 15, 1998.

Libros recientes

- Feldheim D. L., Foss C. A. Jr., *Metal Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Applications*, Marcel Dekker, New York, 2001.
- Klabunde K. J., *Nanoscale Materials in Chemistry*, John Wiley and Sons, New York, 2001.
- Rosoff M., *Nano-Surface Chemistry*, Marcel Dekker, New York, 2001.
- Texter J., *Reactions and Synthesis in Surfactant Systems*, Marcel Dekker, Rochester, 2001.
- Johnson, G., *A Shortcut Through Time: The Path to the Quantum Computer*, 2003.

Una novela relacionada e interesante

- Prey*, de Michael Crichton, Editorial Harper Collins, 2002.