

Lección inaugural del curso académico 2005-06
por el Dr. D. Manuel Fuentes
Profesor Ordinario de la Escuela Superior de Ingenieros

Pamplona, 22 de septiembre de 2005

Depósito Legal: NA. 2217 - 2005

EUROGRAF NAVARRA, S.L. Pol. Industrial, Calle O, nave 31 - Mutilva Baja (Navarra)

**LA NANOTECNOLOGÍA
Y SU IMPACTO
EN LA SOCIEDAD DEL SIGLO XXI**

Excmo. Sr. Rector Magnífico,
Excmos. e Ilmos. Sres.,
Compañeros de trabajo universitario,
Sras. y Sres.,

Los últimos 20 años han sido testigos de una vertiginosa actividad y de un inusitado interés por las nanotecnologías. Y es que su potencial industrial y sus implicaciones sociales bien pueden calificarse de formidables. Son numerosas las economías –economías avanzadas– que están experimentando ya la “Revolución Nanotecnológica”, una revolución que se pronostica afectará a la sociedad de forma invasiva –tan tremendamente invasiva– como las tecnologías de la información y de las comunicaciones, o la biología molecular, en la última década del Siglo XX. De aquí el peso creciente que está cobrando la investigación nanotecnológica en el ámbito universitario, que no puede mantenerse ajeno a los tremendos desafíos, también de orden ético y moral que sus desarrollos encierran.

El concepto de Nanotecnología lo esbozó, hace casi medio siglo, el Premio Nóbel de Física Richard Feynman. En su conferencia *“There’s plenty of room at the bottom”* [1, 2], pronunciada ante la Sociedad de Física Norteamericana en 1959, en el *California Institute of Technology* de Pasadena, Feynman se lamentó de la falta de iniciativas en torno a la “fabricación de cosas a escala pequeña”.

Un sistema biológico, señalaba, puede ser extremadamente pequeño. La mayoría de sus células son diminutas, pero son muy activas; fabrican numerosas sustancias; se mueven; se contornean; y realizan todo tipo de cosas –cosas maravillosas– a una escala muy pequeña. Almacenan también información. Está a nuestro alcance, decía, el hacer cosas extremadamente pequeñas que realicen funciones extremadamente complejas; esto es, está a nuestro alcance fabricar objetos que funcionen de esa manera.

Y es que la nanotecnología es, sin duda, una nueva palabra, pero no enteramente un nuevo concepto. La Naturaleza presenta multitud de objetos y procesos que operan a un nivel micro y nanométrico [3-5]. Entender su funcionamiento permitiría plantearse una cierta imitación y fabricar nuevos nanodispositivos y nanoestructuras.

LA NATURALEZA FUENTE DE INSPIRACIÓN DE LAS NANOTECNOLOGÍAS

Miles de millones de años atrás, las moléculas, siguiendo el diseño de la Mano Creadora, comenzaron a organizarse en la forma de estructuras más y más complejas que permitieron el nacimiento de la vida. La fotosíntesis aprovecha la energía procedente del sol para proporcionar vida a una planta; lo que incluye moléculas recolectoras de luz, tales como la clorofila, dispuestas en el interior de las células en escalas nanométricas y micrométricas. Estas estructuras capturan la energía de la luz y la transforman en energía química que mueve toda la maquinaria bioquímica de las células vegetales.

Los seres vivos emplean energía en forma química para mover sus organismos. Las colas de algunas bacterias flageladas –un tipo de bacterias– llegan a girar a velocidades superiores a las 10.000 revoluciones por minuto /6/ y constituyen un claro ejemplo de lo que puede hacer una máquina molecular biológica. El flujo de protones, causado por la diferencia de potencial a través de la membrana, es el motor del flagelo. El diámetro del rodamiento es del orden de 20-30 nm y su holgura se estima en torno a 1 nm. Un ejemplo más común, que también ofrece la naturaleza, lo proporciona el mosquito, capaz de volar, andar, succionar sangre y detectar el CO₂ que emitimos, es decir, con capacidad de observar, detectar, navegar, etc., funciones que integra en una masa sustancialmente inferior al gramo.

En el contexto de la tribología, –esto es, en el contexto de la ciencia y tecnología de la interacción (fricción, lubricación y desgaste) entre superficies con movimiento relativo– hay sistemas biológicos con superficies antiadherentes. Así sucede, que muchas hojas (por ejemplo, la del loto) están recubiertas de una cutícula hidrofóbica, compuesta de una mezcla de largos hidratos de carbono, fuertemente hidrofóbicos. También se encuentran superficies con una distribución específica de la rugosidad /7, 8/. En las publicaciones científicas aparece descrito que la rugosidad de ciertas hojas hidrofóbicas disminuye la cantidad de agua adherida, lo que se refleja en un incremento en el ángulo de mojado entre las gotas de agua y la superficie de la hoja¹.

Uno de los principales beneficios de la investigación en sistemas biológicos a escala reducida bien podría ser la integración de conceptos biológicos básicos dentro de las nanotecnologías. La comprensión y los intentos de aplicación de los principios de funcionamiento de la biología en estructuras artificiales, previsi-

¹ Obsérvese que para las plantas el escurrir rápido el agua de la lluvia y permanecer secas (al igual que la piel en los humanos) es de vital importancia para reducir su colonización por parte de hongos y mohos.

blemente conducirá a un cambio radical en la forma de pensar y de plantear el desarrollo de nanosistemas.

Por ejemplo, si se pretende producir sistemas de procesamiento de la información a escalas nanométricas, ¿son las técnicas actuales, basadas en la fotolitografía y cableado de componentes electrónicos, las más adecuadas? ¿Se derivarían ventajas del empleo de sistemas fundamentados en un procesado disperso de la información, como hacen las biocomputadoras celulares /9/, o los ordenadores de ADN /10/, que basándose en interacciones bioquímicas en soluciones acuosas realizan sofisticados, aunque limitados, cálculos sin necesidad de construir complejas tarjetas de circuitos o circuitos integrados? Aún si la posibilidad de fabricar aparatos para el mercado de consumo resultara en este estado inviable /11/, este tipo de investigación fundamental indica que es factible: i) ingeniar sofisticados sistemas computacionales con materiales biológicos nanoscópicos y ii) construir equipos de procesamiento de información que no necesitan cableados al estilo de los que se usan en los computadores digitales.

Otro ejemplo a considerar, en busca de conceptos básicos, es el autoensamblado biológico que hace referencia a la tendencia de ciertas moléculas para autoorganizarse según un patrón regular a escala nanométrica, consecuencia de su movimiento aleatorio y de la afinidad de unos grupos funcionales con otros. Los sistemas biológicos invariablemente se autoensamblan y se autoorganizan en estructuras más y más complejas. Es la información embebida en estas subunidades la que dirige y gestiona su organización en estructuras muy especializadas a niveles nano y macroestructural sin recurrir a la fotolitografía u órdenes externas.

Los lípidos y otras moléculas anfífilas forman, por ejemplo, estructuras bien definidas –de tipos laminares, hexagonales, cúbicas, etc.– en agua, dependiendo, únicamente de la estructura inicial de la molécula del lípido /12-14/.

Estas estructuras pueden luego usarse para generar nuevas formaciones. Por ejemplo, en las estructuras tubulares de lípidos/agua, el agua puede reemplazarse por materiales inorgánicos o metálicos, produciéndose formas nanoparticuladas tales como nanobastones /15/, que pueden usarse para construir nanomateriales tridimensionales; v.gr. los sistemas de filtrado descritos por Lu /16, 17/. Las propiedades que exhiben las monocapas autoensambladas, como materiales de protección o recubrimiento inteligente de superficies, están relacionadas directamente con la forma en la que la membrana celular –una estructura laminar formada por el ensamblado de lípidos– protege el contenido de la célula. /18/.

Llevando los ejemplos de la naturaleza aún más lejos e inspirándose en cómo la incorporación de los grupos fitanilos –moléculas que se encuentran en los organismos extremófilos, capaces de sobrevivir en los ambientes más hostiles– mejoran el comportamiento, como agente protector, de sus membranas /19/, se están consiguiendo modelos que permitirán desarrollar superficies con alto grado de protección.

También se inspira en la naturaleza la investigación nanobiológica orientada al desarrollo de sensores químicos. Ahora mismo, los sensores portátiles más sensibles y específicos son el sentido del olfato y otros órganos similares del mundo animal. Estos detectores de sustancias invariablemente se basan en el enlace de la molécula que se pretende detectar a un receptor biológico específico, ubicado en el órgano sensible, que produce la apertura o el cierre de un canal de iones embebido en una membrana celular aislante. Cuando están abiertos, los canales permiten el flujo de varios millones de iones por segundo de uno a otro lado de la membrana. Cuando una única molécula de la sustancia que se pretende detectar produce el cierre de un único canal, al impedirse el flujo de iones correspondientes se genera un factor de amplificación de varios millones de veces, circunstancia que explica la enorme sensibilidad de este tipo de sensores biológicos.

LOS ALBORES DE UNA NUEVA DISCIPLINA

Casi 25 años después, en 1983, en el marco de una segunda conferencia /20/, pronunciada esta vez en el *Jet Propulsion Laboratory of Pasadena*, Feynman se hizo eco de lo poco, de lo muy poco, que se había avanzado en el desarrollo de micromáquinas y de lo poco que se había hecho en el ámbito de la ultraprecisión, si bien constató la reducción que habían experimentado, desde su anterior conferencia (1959), los componentes de ordenadores.

El concepto y término de Nanotecnología no lo acuñó sin embargo Feynman. Fue Taniguchi /21/ quien en 1974, también en el marco de una conferencia, introdujo el término nanotecnología. Taniguchi vaticinó el papel crítico que jugarían componentes de dimensiones muy reducidas, ultrapequeños, con precisiones del orden del nanómetro (milmillonésima de metro), en la ingeniería de producción, resaltando la incidencia que tendría la reducción de dimensiones en el ámbito de los circuitos integrados, de los dispositivos electrónicos, en las piezas y componentes de bombas, los rodamientos, y los dispositivos de memoria para computadoras. Taniguchi no sólo subrayó estos campos de aplicación sino que señaló también cuáles podrían ser los procesos de fabricación susceptibles de utilización en la miniaturización de componentes, resaltando el papel del *ion beam* (haz iónico) y *molecular beam* (haz molecular).

Como ocurre siempre que se produce la irrupción de una nueva disciplina, una de las primeras cuestiones a considerar es la de su definición. La formulación de sus objetivos y contenidos fue acometida por primera vez por Feynman, quien definió la nanotecnología como la disciplina que aborda la fabricación y uso de materiales, objetos y dispositivos –y su posterior integración en sistemas– tan pequeños que su unidad de medida es el nanómetro, una escala a la que los bloques nanoestructurados constitutivos del producto final o componente masivo confieren al material nuevas propiedades de orden físico, químico y biológico. En esencia, cualquier propiedad o funcionalidad de un material o sistema puede alterarse drásticamente manipulando y controlando la escala crítica (la dimensión crítica asociada a ésta) de los bloques elementales. La meta última de la nanotecnología es por tanto el aprovechamiento de estas nuevas propiedades a través del control de estructuras y dispositivos a nivel atómico, molecular y supramolecular, lo que requiere de un conocimiento efectivo, profundo, sobre la fabricación y el uso de estos dispositivos.

Feynman fue sin duda un visionario que apoyándose, y extrapolando, las leyes de la física vislumbró las tremendas potencialidades de la miniaturización –años antes de que ésta se materializara en el “*chip*”, término de uso común, incorporado al léxico popular– y esbozó las bases de una nueva disciplina, abriendo un frente que muy pronto suscitaría el interés de científicos y tecnólogos –v.gr. Franks (1987), Drexler (1986) y Siegel (1999)– que contribuirían con sus aportaciones a conformar esta nueva disciplina. Para el primero /22/ nanotecnología es la tecnología de fabricación que permitirá abordar la producción de componentes de ultraprecisión –con tolerancias en la gama 0,1 nm (tamaño del átomo) a 100 nm (longitud de onda de la radiación ultravioleta)– y tamaño extremadamente pequeño en tanto que para el segundo (Drexler /23/) el rasgo diferencial de esta nueva tecnología reside en su idoneidad para producir objetos con propiedades novedosas mediante el ensamblado de átomos o moléculas, de aquí el uso del término ingeniería molecular, sustituido más tarde por el de nanotecnología molecular, subrayando por tanto el papel nuclear que Feynman asignó al proceso de fabricación *bottom-up*. Más genérica resulta la definición de Siegel (1999) /24/ al señalar que el objetivo final de esta nueva disciplina reside en el control de materiales y dispositivos a nivel atómico y molecular, una definición que integra los desarrollos de índole nanotecnológica surgidos en la intersección de las disciplinas académicas (física, biología, química e ingeniería) tradicionales.

Si alguien quiere seriamente buscar la verdad –afirmaba Descartes– no debe elegir una ciencia particular; están unidas entre sí y dependen unas de otras.

Casi cuatro siglos después, la irrupción de las nanotecnologías avala plenamente la declaración de Descartes, y también el núcleo de la misión a la que nos convocó el Fundador y Primer Gran Canciller de nuestra Universidad:

La Universidad, decía San Josemaría, tiene como su más alta misión al servicio de los hombres, ser fermento de la sociedad en que vive; por eso debe investigar la verdad en todos los campos.

Y todos los campos, la física, la química, las biociencias, la ingeniería, la economía, la ética, la sociología –¡con la inclusión de la moral y la metafísica se completaría el árbol de Descartes!– inciden, convergen, se dan cita, en esta nueva disciplina. La investigación en las nanotecnologías brinda por consiguiente un medio de excepción para esclarecer la verdad, enmascarada en una encrucijada multidisciplinar, objetivo último, en palabras de San Josemaría, de la institución universitaria.

PROCESOS DE NANOFABRICACIÓN

Existen dos aproximaciones genéricas a la fabricación de objetos nanoestructurados.

- Una, más convencional, representa lo que se ha dado en llamar un proceso tipo *top-down* (de arriba hacia abajo) y es de aplicación común en la industria de los semiconductores –en la fabricación de dispositivos de tecnología de silicio– sin obviar otros ámbitos de aplicación como es el de los materiales compuestos (*composite materials*), donde la fabricación de las estructuras nanométricas se realiza mediante trituración mecánica, o molienda mediante bolas (*ball milling*) controlada a partir de un producto grueso.
- En la segunda, denominada *bottom-up* (de abajo hacia arriba), la fabricación se realiza mediante el autoensamblado de átomos y moléculas en bloques básicos –nanoestructurados que son quienes confieren al producto final unas nuevas propiedades y funcionalidades, muy superiores a las que exhiben las estructuras (materiales y dispositivos) convencionales– y su subsiguiente ensamblado en el componente masivo.

El autoensamblado molecular juega un papel de capital importancia en el proceso *bottom-up*. El control del autoensamblado en 3D para la fabricación de componentes masivos está en fase de investigación, pero las monocapas autoensambladas *SAMs*, (*Self-Assembled Monolayers*) como materiales de protección o recubrimiento inteligente de superficies son ya

una realidad. Para la formación de monocapas autoensambladas se utilizan cadenas poliméricas con diferentes grupos funcionales en los extremos de cabeza o cola: uno de estos grupos funcionales presenta una fuerte absorción a la superficie a recubrir y el otro posee la propiedad que se quiere transferir a dicha superficie. Una solución de estas cadenas poliméricas en contacto con esta superficie, producirá una monocapa densa de moléculas, todas ellas perfectamente alineadas con el grupo funcional que presente la molécula en el otro extremo apuntando hacia fuera de la superficie. Dependiendo de la naturaleza de este grupo, la funcionalidad química de la superficie se puede variar enormemente. Por ejemplo, cabe la posibilidad de depositar otra monocapa de otra molécula que presente alta reactividad con ese grupo funcional o de absorber cadenas de ADN de forma selectiva. Es decir, se puede dar lugar a una infinidad de potenciales aplicaciones, como por ejemplo, el reconocimiento molecular, la clasificación selectiva de enzimas, sistemas de liberación controlada de medicamentos, metalización de superficies orgánicas, protección a la corrosión y/o la fabricación de capas monoatómicas de nanohilos o de fotorresinas.

La adopción de una estrategia *bottom-up* no excluye su integración con la estrategia *top-down*. Valga como ejemplo el reciente planteamiento de IBM que está incorporando el autoensamblado molecular a las técnicas convencionales de fabricación de dispositivos microelectrónicos. En este caso, la autoorganización de las moléculas se puede utilizar para definir geometrías con patrones extremadamente pequeños –de hecho el límite estaría en el tamaño de las moléculas– y con mayor precisión y uniformidad que la que permiten los métodos de litografía convencionales. A modo de ejemplo, el autoensamblado se está ya utilizando para fabricar los elementos críticos de nuevos dispositivos de memorias *flash* basados en una matriz de nanocristales de silicio espaciados regularmente², que son muy difíciles de fabricar mediante métodos convencionales.

CONVERGENCIA DE DISCIPLINAS

Hasta ahora todos los desarrollos que ha aportado la nanotecnología han surgido siempre en la zona de intersección de las disciplinas clásicas, de aquí su fuerte carácter interdisciplinar.

² Esta innovación nanotecnológica se describe en un artículo titulado “Low Voltage Scalable Nanocrystal FLASH Memory Fabricated by Templated Self Assembly” presentado por IBM en el IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) en Washington D.C. en 2003.

– Así está ocurriendo con los desarrollos de electrónica molecular que tanta incidencia están llamados a tener en el ámbito de la microelectrónica, y más concretamente en la sustitución de la tecnología de silicio, actualmente en uso, por una de nuevo cuño. Como es bien sabido, como consecuencia de la espectacular evolución del *chip* hacia la miniaturización y del crecimiento exponencial del número de transistores que integra (ley de Moor), la anchura de pista ha pasado de las 2 micras de 1980, esto es de los 2000 nm de ese año, a los 100 nm de 2004, una reducción que proyectada al año 2015 se prevé alcance los 35 nanómetros. Esta dramática evolución entraña formidables desafíos de orden ingenieril y científico, tanto en lo que se refiere a su fabricación, pues se prevé que el número de defectos aumente dramáticamente, como a su propio funcionamiento –regido para estas dimensiones por fenómenos cuánticos– severamente limitado por el sobrecalentamiento que entraña el creciente número de transistores, y la consiguiente reducción de anchura de pista, sin mencionar los desorbitados costos e inversiones asociados a su fabricación: el precio de las instalaciones de fabricación de los circuitos integrados que se precisan para conseguir las predicciones del *roadmap* del SIA (Semiconductor Industry Association) puede llegar a exceder la estimación de las ventas.

Todo parece indicar que la salida a esta encrucijada será la introducción de los dispositivos de electrónica molecular, susceptibles de: i) operar como interruptores lógicos mediante interacciones químicas, usando compuestos orgánicos y ii) de ordenarse y de organizarse para conformar una nueva generación de ordenadores de muy bajo consumo. Pero la introducción de esta nueva tecnología, surgida en la intersección de la electrónica con otras disciplinas, particularmente con la biología, plantea también grandes retos: se habrán de sortear los problemas que afectan a su estabilidad y los relativos a la elevada densidad de defectos e interconexiones. Sin embargo, a largo plazo, la electrónica molecular se presenta como una clara alternativa a la tecnología de silicio.

– Merece señalarse que la explotación de los principios biológicos no se limita sin embargo a la electrónica molecular.

Por ejemplo, la combinación de sub-unidades micrométricas y nanométricas de sistemas vivos e inanimados está propiciando el alumbramiento de una nueva línea de dispositivos electrónicos y de sensores.

De gran impacto es también la técnica de los *microarrays* de ADN, fruto de la intersección de la biología y la física. Como es sabido, los *microarrays* consisten en un sustrato de vidrio o de sílice, sobre el que se fijan químicamente miles de fragmentos de ADN de origen conocido que se pone en

contacto con una muestra con las moléculas que se pretenden analizar, marcadas por una molécula fluorescente. El posicionamiento y cuantificación de la señal fluorescente que genera la reacción química (hibridación) con alguna de las fibras del *microarray* o *chip* facilita, en un solo paso, su identificación, posibilitando el análisis de decenas de miles de genes simultáneamente en un solo *array* y el subsiguiente cálculo de la expresión génica, es decir, cuánto se está utilizando cada gen. De forma parecida se utilizan los *microarrays* para el análisis de proteínas, recurriendo ahora a superficies plásticas recubiertas de anticuerpos, antígenos, y enzimas. Como está ocurriendo en tantos otros ámbitos de las microtecnologías, los *microarrays* presentan importantes limitaciones, puestas de manifiesto sobre todo en el análisis de la interacción proteína a proteína, que están promoviendo la ultraminiturización y génesis de *nanoarrays* de proteínas, capaces de “acomodar” volúmenes insignificantes de biomoléculas en superficies con una elevada precisión espacial. Obviamente la evolución de los *microarrays* a los *nanoarrays* potenciará y ampliará el espectro de sus aplicaciones.

Esta combinación de estructuras físicas y biológicas se utiliza también como sensores en otras situaciones, entre las que cabe destacar el control médico y el control medioambiental.

- Análogamente la profundización en la química compleja y en la química supramolecular ha permitido: i) el desarrollo y fabricación de estructuras, a nivel atómico y molecular, diseñadas a medida y ii) el acceso a una nueva generación de catalizadores, membranas, sensores y recubrimientos.
- Por otra parte la intersección de la biología y las ciencias cognitivas ha propiciado la génesis de numerosos desarrollos entre los que cabe destacar la aplicación de redes neuronales computacionales a la predicción de las propiedades de materiales nanoestructurados y a la optimización y control de nanodispositivos, así como al uso de estos en la monitorización de las respuestas cerebrales a estímulos visuales, acústicos y táctiles, de gran impacto en el ámbito de las minusvalías.

POTENCIAL COMERCIAL DE LAS NANOTECNOLOGÍAS

Son muchas las aplicaciones que ofrecen las nanotecnologías pero muy reducido el número de las que realmente han emprendido –y en menor medida aún el de las que han superado– el proceso de comercialización.

Los ladrillos acumuladores de luz ofrecen un ejemplo de una aplicación en proceso de comercialización.

– Las prestaciones de los primeros –descubiertos y desarrollados por un equipo de investigadores coreanos– se fundamentan en su capacidad para generar de forma extremadamente eficaz energía renovable para el alumbrado /25/. El uso de estos ladrillos, de naturaleza copolimérica, bien podría solucionar, se anuncia, la grave crisis energética que padece el estado de California. Según informaciones recientes, las conversaciones que mantienen las autoridades del Departamento de Energía de los Estados Unidos con los representantes de la empresa fabricante de los ladrillos acumuladores de luz, conducirán a su implantación comercial en breve plazo. El tamaño de los ladrillos es muy parecido al de los convencionales y en su producción se utilizan las más sofisticadas tecnologías de fabricación de nanomateriales.

Un comentarista describía los ladrillos de luz como uno de los inventos del siglo XXI. Su uso –respetuoso con el medio ambiente– se prevé producirá un ahorro energético en torno a 4000 millones de dólares al año en electricidad en el Estado de California.

Cada ladrillo contiene del orden de 16 millones de microcajas recubiertas de una superficie especular, altamente reflectante, y cada caja cuenta con un nanomotor que, actuando sobre una nanobisagra, permite abrirla o cerrarla en fracciones de milisegundos. Mediante esta rapidísima apertura y cierre de las microcajas se atrapa la luz. El procedimiento para usar los ladrillos es relativamente simple: se colocan al sol y a medida que las microcajas se van llenando de luz se cierran los obturadores que controlan su paso. Por la noche, las microcajas se programan para que se abran y liberen la luz, proveyendo así de una iluminación energéticamente renovable.

Los científicos estiman que con una docena de estos ladrillos se puede iluminar durante ocho horas un hogar de tamaño medio. Y se está intentando mejorar sus prestaciones. Hoy en día, señalaba el referido comentarista, se están atrapando 8.000 millones de fotones por microcaja, pero se espera elevar esta cifra a 64.000 millones, lo que representaría multiplicar por ocho la luz emitida. Para ello se están empleando compresores hidráulicos nanométricos que “comprimen” los fotones a presiones más elevadas, de modo que se aumenta el número de fotones acumulados en cada microcaja. Aun cuando los fotones que se pretende almacenar a grandes presiones tienden a escaparse del ladrillo en forma de fognazo, existen fundadas esperanzas de que en un futuro próximo se superarán estas dificultades.

Mucho más lejos de su comercialización están los desarrollos orientados al almacenamiento del gas hidrógeno como fuente de combustible para el sector de automoción.

- Como es conocido, el almacenamiento de hidrógeno es el factor que más condiciona su uso en los modernos motores ecológicos. Actualmente, su almacenamiento exige aplicar grandes presiones, de aquí que tanto en estado líquido como gaseoso se realice en pesados contenedores metálicos o balas, circunstancia que excluye o frena su utilización comercial. Para soslayar esta dificultad se están explorando otras fórmulas de almacenamiento del gas, que no conlleven la aplicación de grandes presiones, como sucede con las pilas de combustible, que se basan en la capacidad de ciertos materiales para descomponer el hidrógeno molecular en hidrógeno atómico (que en función de su pequeño tamaño penetra e impregna el material) y almacenarlo en su interior. Estas nanoestructuras no sólo poseen una rápida cinética de absorción/desorción /26/ sino que mantienen también su integridad –es decir, no se desmenuzan– bajo la acción de los ciclos de carga/descarga. Se trata en realidad de un aglomerado o compacto en verde con una densidad obviamente inferior a la teórica.

Entre las nanoestructuras que cumplen estos requisitos destacan por su singularidad los nanotubos de carbono, una fibra hueca que posee la perfección de la distribución atómica hecha célebre por su predecesor, el C_{60} , una molécula descubierta en la segunda mitad de la década de los 90 que se asemeja a un balón de fútbol o a una jaula esférica. Su descubrimiento lanzó al estrellato científico a R. E. Smalley, H. W. Kroto y R. F. Curl, que fueron galardonados en 1996 con el Premio Nóbel de Química. Estas insólitas fibras huecas, dotadas de propiedades electrónicas y mecánicas fascinantes, han pasado a engrosar, junto al grafito y el diamante, la familia del carbono. Su capacidad para “succionar” y retener grandes cantidades de hidrógeno –resultado de la interacción, atractiva, entre el carbono y el hidrógeno– con sobrepresiones bajas y temperaturas ligeramente inferiores al ambiente, y para liberarlo, al incrementar ligeramente la temperatura, hace de los nanotubos un medio ideal, básico e insustituible en la tecnología de acumuladores de hidrógeno.

Algo parecido ocurre –por lo que respecta a las perspectivas temporales de su explotación comercial– con los desarrollos de índole electrónica basados en las singulares propiedades que exhiben los nanotubos.

Hace sólo unos años que las predicciones teóricas acerca del comportamiento eléctrico de los nanotubos fueron confirmadas experimentalmente. En 1997 el Grupo Zettl /27/ logró manipular individualmente nanotubos de

carbono en el microscopio electrónico de efecto túnel y medir su conductividad, observándose que dependiendo de la orientación de los anillos hexagonales de carbono respecto a su eje, el comportamiento varía de conductor a semiconductor: cuando los anillos están orientados según el eje, el nanotubo exhibe carácter metálico mientras que cuando están girados en forma helicoidal tiene carácter semiconductor. Este desdoblamiento de “personalidad” puede provocarse induciendo una imperfección específica: la que resulta de sustituir ciertos anillos hexagonales, inicialmente alineados con el eje, por anillos pentagonales, ligados a anillos heptagonales. En línea con lo expuesto, tras esta “operación” uno de los extremos se comportará como conductor y el otro como semiconductor. Un nanotubo de estas características funcionará en definitiva como un diodo, como un diodo molecular. Conductores, semiconductores o aislantes, según su geometría, los nanotubos están llamados a jugar un papel de capital importancia en el desarrollo de la electrónica a escala nanométrica.

Mucho más lejos de su explotación comercial están otras aplicaciones potenciales que bien podrían tacharse de futuristas y que de materializarse algún día colmarían, cuando no superarían, las más ambiciosas expectativas del hombre, sobrepasando los límites de su imaginación. Tal es el caso del ascensor espacial, fundamentado en las formidables propiedades mecánicas, sin obviar las de orden eléctrico y magnético, que exhiben los nanotubos de carbono, estructuras tubulares de superficies de *grafeno* –formadas por una red hexagonal bidimensional de átomos de carbono fuertemente unidos por enlaces covalentes de tipo *– (carbon nanotubes, CNT)–* con un espesor de pared de 0,34 nm y unos pocos nanómetros de diámetro [28].

- A mediados del Siglo XIX, la propuesta de tender un cable telegráfico transoceánico de varios miles de kilómetros pudo parecer una quimera, pero no tardó mucho en hacerse realidad. Aunque el primer cable telegráfico trasatlántico se completó en 1858, apenas sobrevivió. Fue en 1866, bajo el impulso de Lord Kelvin y el financiero americano C.W. Field que también promovió el primer intento, cuando se consiguió una unión duradera. No se trataba por tanto de un proyecto de ciencia-ficción, sino de ingeniería-ficción. ¿Es una quimera mayor el proyecto actual de un “ascensor espacial” que permita subir y bajar por un cable mercancías de la tierra a una plataforma espacial geoestacionaria, ponerlas en órbita a cualquier altura intermedia o lanzarlas más allá al espacio exterior?

Un satélite geoestacionario tiene que estar situado a unos 36.000 km. de altura. Durante un tiempo, la idea de un ascensor espacial es, o ha sido, literalmente ciencia-ficción en dos sentidos. En primer lugar, porque la idea surgió de la lite-

ratura de ciencia-ficción: aunque la idea original es algo anterior /29/ fue Arthur Clarke, quien la popularizó en 1978, en una novela de las llamadas “de anticipación”, *Las Fuentes del Paraíso* /30/, donde describía un largo cable que los ingenieros del futuro hacían bajar desde un satélite en órbita geoestacionaria para hacer de montacargas espacial entre la tierra y el satélite. El concepto es sencillo: “basta” anclar a la tierra el extremo de un cable de longitud y resistencia adecuadas, desplegado hasta más allá de la órbita estacionaria, de manera que el peso del cable hasta esa altura quede compensado por la fuerza centrípeta que soporta el resto de longitud hasta el extremo. Y, por supuesto, instalar un ascensor dotado de algún medio mecánico y energía para trepar o descender por ese cable, eliminando la necesidad de utilizar peligrosos y costosos cohetes para poner masas en órbita.

Su realización abarataría enormemente la experimentación –y, probablemente, la fabricación industrial– sin gravedad. Y la exploración espacial extraterrestre (se estima actualmente que el coste de poner 1kg en órbita bajaría de 20.000\$ a 200\$). Sin embargo, esta propuesta era también verdadera ciencia-ficción, en el sentido más estricto, por ser irrealizable con los conocimientos disponibles: ningún material existente o imaginable en 1978, cuando Arthur Clarke publicó su novela, permitía fabricar cables que no se rompieran bajo su propio peso para longitudes mayores de 50 km. La altura máxima de un cable al nivel de la superficie terrestre es una cuestión de resistencia específica, es decir, depende de la relación entre la resistencia del material del cable y su densidad.

Los filamentos largos de máxima resistencia de esa época eran –y siguen siendo– alambres de acero de una o dos décimas de milímetro de diámetro, fuertemente trefilados, con una resistencia tractiva inferior a 5.000 MPa, y densidad 7870 kgm⁻³. Son los alambres con los que se fabrican los cables de ascensores o de teleféricos, de puentes colgantes, etc., cuya resistencia efectiva en el producto comercial es inferior a la mitad de esa resistencia máxima. Las fibras más cortas de máxima resistencia conocida, los pequeños monocristales de diámetro microscópico y gran perfección conocidos como whiskers, solo disponibles en muy pequeñas cantidades, no permitirían aumentar esa altura máxima más allá de 200 km, aunque alguien ideara una técnica para obtenerlos como fibras largas /31/.

En 1991, año en el que el investigador japonés de NEC Corp. Sumio Iijima descubrió³ “oficialmente” los nanotubos de carbono, la idea del ascensor

³ En este año Sumio Iijima obtuvo sus primeras muestras, creando un arco eléctrico de corriente continua entre electrodos de carbono inmersos en un gas inerte.

espacial pasó de ser ciencia-ficción a ser “mera ingeniería-ficción”. Los nanotubos de carbono presentan una resistencia de unos 100 GPA y una densidad unas seis veces inferior a la del acero, es decir, poseen una resistencia específica 100 veces mayor que la de los cables de acero más resistentes. Su máxima longitud autoportante sería de unos 50.000 km. considerando (por exceso) la tracción gravitatoria a nivel de la superficie terrestre, por lo que, con ellos, el límite de la altura de la órbita geoestacionaria (35800 km.) podría sobrepasarse ampliamente.

Se deduce por tanto que el proyecto de ascensor espacial puede hacerse realidad. De hecho ya lo es, al menos desde el punto de vista norteamericano (EEUU) donde no hay nada más real que los dólares: hay quien desde el año 2000 se ha embolsado más de medio millón de dólares de la agencia de ideas avanzadas (NIAC) de la NASA para trabajar en ello /32, 33/. En julio de 2004 tuvo lugar en Washington el *Space Elevator 3rd Annual International Conference* y aunque esto pueda parecer una idea descabellada, se ha de señalar que la citada agencia NIAC está financiando ya el proyecto de un ascensor espacial para la luna /34/. Hacerlo y mantenerlo allí resulta mucho más fácil: la fuerza gravitatoria es menor, no hay atmósfera que atravesar, con sus vientos y sus rayos, y se elimina el riesgo de que la chatarra espacial o cualquier satélite artificial corte el precioso cable. Al igual que en el caso terrestre existe el peligro de que se produzca el impacto de meteoritos, pero el diseño del cable (de la cinta *composite* de CNT, en realidad) cuenta con ello, es tolerante al daño (*Damage Tolerant*).

IMPACTO DE LAS NANOTECNOLOGÍAS EN LOS SISTEMAS EDUCATIVOS

Ya en 1998 el asesor científico del Presidente Clinton, Neal Lane, pronosticó el papel trascendental que tendrían las nanotecnologías en el desarrollo socioeconómico de la primera parte del Siglo XXI:

El área de las nanociencias y de las nanoingenierías, decía, alumbrará con toda seguridad los grandes avances del futuro próximo, será el soporte de los avances rupturistas que se producirán en este período.

En términos análogos se expresaría dos años más tarde el mismo Presidente Clinton, al manifestar su compromiso con la investigación en las nanociencias y nanoingenierías, al tiempo que se hacía eco de los desafíos que su impulso representaba para el estamento educativo en orden a formar una nueva generación de científicos, tecnólogos y técnicos, con una perspectiva auténticamente

interdisciplinar, capaces de materializar las potencialidades de una nueva disciplina, que conlleva la creación de un nuevo cuerpo de conocimientos, concretado en la disponibilidad de nuevas herramientas, nanoestructuras y métodos, que permitan realizar nuevos dispositivos nanoelectrónicos, tanto por miniaturización de las técnicas de fabricación clásica (aproximación *top-down*), como a partir de la utilización de bloques básicos (moléculas o átomos, aproximación *bottom-up*). La demanda de este nuevo tipo de profesionales aumentará, se prevé, a un ritmo muy acelerado. Recientes estimaciones /35/ sitúan esta demanda, para el año 2010, en torno a 900.000 en los Estados Unidos, 600.000 en Europa, 400.000 en Japón y 200.000 en el Sureste Asiático, estimaciones coherentes con el acelerado crecimiento que está experimentando el volumen de negocio asociado a esta tecnología, evaluado solo en el ámbito de los nanomateriales en 20.000 millones de dólares en el año 2000, más de dos veces superior a la del año 1998.

Parece lógico pensar por tanto que el desarrollo nanotecnológico estará íntimamente ligado a la disponibilidad de profesionales con un nuevo perfil, instruidos en los principios, técnicas, y herramientas propias de la investigación nanotecnológica e informados sobre sus implicaciones sociales y éticas. Urge por tanto reconsiderar la vigencia de los sistemas educativos tradicionales, estructurados en disciplinas individuales bien acotadas. Urge acelerar la convergencia entre las ciencias físicas, biológicas, médicas y las ingenierías con vistas a dotar a los nuevos profesionales de una capacidad de comunicación de la que actualmente carecen, lo que entraña el desafío de rediseñar en profundidad los currícula académicos y de otros ciclos formativos, que deberán compatibilizar la amplitud e intensidad de sus contenidos.

Así por ejemplo, el nuevo ingeniero de materiales deberá poseer conocimientos de mecánica cuántica y estar instruido en los principios que subyacen en las técnicas y herramientas de caracterización y manipulación, a nivel atómico, de nanomateriales y nanodispositivos, unas herramientas en continuo proceso de refinamiento que han impulsado en buena medida el desarrollo de las nanociencias y nanotecnologías. A este respecto, cabe destacar el papel desempeñado por el microscopio de efecto túnel (*STM: Scanning Tunnelling Microscope*) y más aún por el microscopio de fuerza atómica (*AFM: Atomic Force Microscope*), una herramienta que ha posibilitado: i) la manipulación de átomos /36/ y moléculas /37, 38/, ii) la observación de superficies conductoras o aislantes /39/, iii) la medida de propiedades elastoplásticas /40-54/, y iv) la nanofabricación /40, 41, 55-57/ y nanomecanizado /58/ de materiales. De forma análoga deberá reconsiderarse los currícula de las titulaciones con enfoque más básico, que verán reforzado su papel ante la imperiosa necesidad de simular y predecir comportamientos y fenómenos antes de asumir las cuantiosas inversiones que su exploración y verificación experimental conllevan.

La oferta de cursos en ingeniería de superficies, dinámica molecular, efectos cuánticos e ingeniería de fabricación a nivel molecular, ya en proceso de experimentación en algunos lugares, será un hecho común en muchas universidades. En definitiva, será preciso integrar la docencia y la investigación en un nuevo paradigma interdisciplinar, radicalmente diferente al tradicionalmente adoptado, basado en disciplinas individuales bien acotadas en su enfoque y contenidos.

IMPLICACIONES SOCIALES Y ÉTICAS DE LAS NANOTECNOLOGÍAS

Los descubrimientos científicos no suelen cambiar directamente la sociedad sino que preparan el escenario para que ocurra el cambio, que en general ocurre por la confluencia de las viejas y las nuevas tecnologías, dentro de un cambiante contexto de necesidades económicas. El ámbito de la nanotecnología es tan amplio que sus efectos tardarán décadas en permear los sistemas económicos y sociales. Uno de los mayores problemas para predecir su evolución reside en que los cambios que tendrán lugar podrían depender más de los usuarios que de los actores, de los auténticos protagonistas, del desarrollo nanotecnológico. Si como los estudios de prospectiva indican la nanotecnología está llamada a revolucionar las técnicas de fabricación y el ámbito de la salud, del suministro energético, del transporte y de la defensa, las nanotecnologías transformarán también el mundo laboral. Pero ninguno de estos últimos cambios ocurrirá, se vaticina, sin que se produzca una fractura social importante.

Lo previsible es que las nanotecnologías proporcionen inicialmente un número limitado de productos y servicios, costosos, que los consumidores estarán dispuestos a adquirir en función de las nuevas, o mejoradas, prestaciones que ofrecen. Por tanto, las nanotecnologías, más que suplantar a las tecnologías convencionales coexistirán con ellas durante un cierto período de tiempo, lo que permitirá evaluar su impacto ético y social.

Es muy probable que la primera ola de innovaciones afecte al campo de la detección y la sensórica. Las potencialidades de las nanotecnologías para detectar, e identificar, con precisión virus, e incluso moléculas simples, abren el campo a muchas aplicaciones –v.gr. en el ámbito del diagnóstico clínico, la medicina forense, la defensa, y la vigilancia y control medioambiental– que presentan con frecuencia sin embargo grandes desafíos de orden moral y ético.

Es evidente que las capacidades antes señaladas encierran grandes beneficios, pero la cuestión está en cuál será su costo, su costo social.

- Así en la esfera de la detección, siempre que la capacidad para revelar la presencia de un “agente” supere la de respuesta para neutralizarlo o controlarlo –algo que suele ocurrir con frecuencia surgirán inevitablemente dilemas éticos y políticos. Por ejemplo, la detección de contaminantes en cantidades minúsculas plantearía interrogantes acerca del umbral de riesgo y de los procedimientos de corrección. En este contexto cabría especular sobre la problemática que suscitaría, por ejemplo, la aparición de trazas de un material tóxico en el agua subterránea. Parece lógico pensar que, con toda probabilidad, se produciría una justificada alarma social, aún cuando se desconocieran los riesgos para la salud y se careciera de capacidades para neutralizarlos. Tal alarma provocaría –de hecho se dan casos en los que se está produciendo ya– el cierre de las empresas potencialmente contaminantes, generándose graves problemas de orden social y económico.
- Otro ejemplo podría darse en el ámbito de la medicina, un campo en el que las innovaciones nanotecnológicas se prevé incidirán fundamentalmente en las tecnologías de instrumentación, que por su elevado costo podrían beneficiar únicamente a las clases más acomodadas, agravando las desigualdades sociales.

En suma, resulta evidente que la introducción de las nanotecnologías generará graves desafíos, que en una primera aproximación podrían agruparse en los relativos al establecimiento de los objetivos de desarrollo social y económico que se pretenden alcanzar, y a la distribución y reparto de sus beneficios, sin obviar por su capital trascendencia ética y moral los riesgos que puede entrañar su capacidad para diagnosticar enfermedades, por ejemplo predisposiciones genéticas a ciertas enfermedades y defectos congénitos, y adoptar medidas incompatibles con la inalienable dignidad del ser humano, proyectando, en palabras de Juan Pablo II, *graves sombras sobre una búsqueda científica que podría estar al servicio del egoísmo del más fuerte*.

Lo que sí parece evidente es que la investigación en esta emergente disciplina cobrará, por mucho que la situación española tienda a cuestionarlo⁴, cada día más importancia. Universidades y centros de investigación de excelencia, y más

⁴ Una reciente comunicación de la Unión Europea (www.cientifica.com/archives/000120.html) indica que España invirtió en 2003 sólo 0,04 euros per capita en nanotecnologías, situándose a la cola de los países que conformaban la Unión Europea de los quince. Su gasto total ascendió en ese año a 1,6 millones de euros, frente a los 60 millones de euros invertidos, por citar un ejemplo, por Australia, país que cuenta con una población en torno al 50% de la española.

específicamente aquellos Grupos de trabajo focalizados en el estudio de fenómenos a escala micrométrica, se están posicionando ya en este nuevo dominio científico/tecnológico. Este es el caso del Grupo en Microsistemas, del tándem constituido por la Escuela de Ingenieros de San Sebastián, llamada también Tecnun, y el CEIT, hoy integrado en el centro de investigación cooperativa CMIC: Microgune, involucrado en el estudio de cuestiones tecnológicas de vanguardia como el desarrollo y producción de, i) cristales fotónicos tridimensionales, un material que interacciona con los fotones como el silicio con los electrones, lo que les confiere el papel de transistores ópticos, con una velocidad de conmutación mucho más rápida que la de los clásicos dispositivos electrónicos y una baja disipación de energía, y ii) silicio nanoporoso para aplicaciones biológicas, como soporte nanoestructurado para la captura y alojamiento de proteínas.

Este es también el caso del Grupo de trabajo en Materiales Nanoestructurados y en menor medida del de Bioinformática, como lo será también, con toda seguridad, de otros grupos de investigación de la Universidad radicados en Pamplona, que habrán de adentrarse en un mundo cargado de formidables desafíos, envueltos *en pleno misterio*, que deberán abordar *magños e innumerables problemas de la vida*, en palabras de Santiago Ramón y Cajal, con el mismo espíritu de humildad y servicio a la humanidad que trasciende de sus Charlas de Café (1921):

“Puesto que vivimos en pleno misterio, luchando contra fuerzas desconocidas, tratemos en lo posible de esclarecerlo, decía el laureado médico aragonés. No nos desaliente la consideración de la pobreza de nuestro esfuerzo ante los magños e innumerables problemas de la vida. Concluida la ardua labor, seremos olvidados, como la semilla en el surco; pero algo nos consolará el considerar que nuestros descendientes nos deberán parte de su dicha y que, gracias a nuestras iniciativas, el mundo, es decir, aquella minúscula parte de la Naturaleza, objeto de nuestros afanes, resultará un poco más agradable e inteligible”.

REFERENCIAS

Referencias

- /1/ R.P. Feynman: There's Plenty of Room at the Bottom, Eng. Sci. 23 (1960) 22-36, and www.zyvex.com/nanotech/feynman.html (1959)
- /2/ Feynman, Richard P. 1961 "There's Plenty of Room at the Bottom", in "Miniaturization" ed Horace D. Gilbert, Reinhold Publishing Corp N.Y., 282-296.
- /3/ I. Amato: Nanotechnology, www.ostp.gov/nstc/html/iwgn/iwgn.public.brochure/welcome.htm or www.nsf.gov/home/crssprgm/nano/nsfnnireports.htm (2000)
- /4/ Anonymous: National nanotechnology initiative, www.ostp.gov/nstc/html/iwgn.fy01budsuppl/nni.pdf or www.nsf.gov/home/crssprgm/nano/nsfnnireports.htm (2000)
- /5/ I. Fujimasa: Micromachines: A New Era in Mechanical Engineering (Oxford Univ. Press, Oxford 1996)
- /6/ C. J. Jones, S. Aizawa: The bacterial flagellum and flagellar motor: Structure, assembly, and functions, Adv. Microb. Physiol. 32 (1991) 109-172.
- /7/ V. Bergeron, D. Quere: Water droplets make an impact, Phys. World 14 (May 2001) 27-31.
- /8/ M. Scherge, S. Gorb: Biological Micro- and Nanotribology (Springer, Berlin, Heidelberg 2000)
- /9/ Simpson M.L.; Saylor, G.S.; Fleming, J.T.; Applegate, B. (2001), trends in biotechnology, 19(8), 317.
- /10/ Adleman, L.M: (1994), Science, 266, 1021.
- /11/ Cox, C.C.; Cohen, D.S.; Ellington, A.D. (1999), Trends in Biotechnology, 17, 151.
- /12/ Ringsdorf, H., Schlarb, B., Venzmer, J. (1988), Angew. Chem. Ing. Ed. Engl., 27, 113.

- /13/ Liu, J.; Feng, X.; Fryxell, G.E.; Wang, L-Q; Kim, A.Y.; Gong, M. (1998), Adv. Mater., 10, 161.
- /14/ Brinker, C.J.; Lu, Y.E.; Sellinger, A.; Fran, H. (1999), Adv. Mater., 11(7), 579.
- /15/ Nikoobakht, B.; Wang, Z.L.; El-Sayed, M.A.; (2000), J. Phys. Chem. B, 104 (36), 8635.
- /16/ Lu, G.Q.M. (2001) <http://nanomac.uq.edu.au/>
- /17/ Lu, G.Q.; Li, H.D.; Ishizaki, K.; Kormarneni, S.; (2001), Colloids & Surfaces A, 179, 131.
- /18/ Ullmann, A. (1996). Chem. Rev., 96, 1533.
- /19/ Braach-Maksvytis, V. Raguse, B. (2000), J. Am. Chem. Soc., 122-9544.
- /20/ Feynman, Richard P. 1993 "Infinitesimal Machinery", J MEMS 2, 4-14.
- /21/ Taniguchi, N. 1974 "On the Basic Concept of Nanotechnology", Proc. ICPE (International Conference on Production Eng.) Tokyo, 18-23.
- /22/ Franks, A. 1987 "Nanotechnology", J. Phys. E: Sci Instrum 20, 1442-1451.
- /23/ Drexler, K. Eric 1992 "Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation", John Wiley: New York.
- /24/ Siegel, R.V., Ho, E. and Roco, M. C. 1999 "Nanostructure Science and Technology: A worldwide study", Kluwer Academic Publishers, New York.
- /25/ "Light bricks" Set To save Electricity
www.scienceagogo.com/news/20010230190630data_trunc_sys.shtml
- /26/ Schwarz, R.B. 1998. Storage of hydrogen powders with nanosized crystalline domains. In R&D Status and Trends, ed. Siegel et al.
- /27/ Philip G. Collins, A. Zettl, Hiroshi Bando, Antreas Theses, R.E. Smalley. Science. Vol. 278. 3 October 1997
- /28/ Iijima, S., Nature, vol. 354, 56-58 (1991)
- /29/ Artsutanov, Y., V Cosmos na Elektrovoze. Komsomolskaya Pravda, 1960.

- /30/ Clarke, A.C., "Las Fuentes del Paraíso", 1978.
- /31/ Gil Sevillano, J., II Congreso Mundial Vasco, Congreso de Nuevos Materiales Estructurales, pp. 137-154. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco Vitoria-Gasteiz, 1988.
- /32/ Edwards, B.C., "The Space Elevator", Phase I Final Report, NIAC (2000) Y Phase II Final Report, NIAC (2003).
- /33/ Pearson, J., "Lunar Space Elevators for Cislunar Space Development", Phase I Study (75000\$), 2004.
- /34/ Edwards, B.C. y Westling, E. A., "The Space Elevator. A Revolutionary Earth-to Space Transportation System", 2003.
- /35/ APEC Industrial Science and Technology Working Group, The APEC Center for Technology Foresight, Nanotechnology: The Technology for the 21st Century, Vol. II The Full Report, Bangkok, Thailand, August 2002, p. 6.
- /36/ D. M. Eigler, E.k. Schweizer: Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, Nature 344 (1990) 524-528.
- /37/ A. L. Weisenhorn, J. E. MacDougall, J.A.C. Gould, S. D. Cox, W. S. Wise, J. Massie, P. Maivald, V.B. Elsings, G.d. Stucky, P.K. Hansma: Imaging and manipulating of molecules on a zeolite surface with an atomic force microscope, Science 247 (1990) 1330-1333.
- /38/ I. W. Lyo, Ph. Avouris: Field-induced nanometer-to-atomic-scale manipulation of silicon surfaces with the STM, Science 253 (1991) 173-176.
- /39/ O.M. Leung, M.C. Goh: Orientation ordering of polymers by atomic force microscope tip-surface interactions, Science 225 (1992) 64-66.
- /40/ B. Bhushan: Handbook of Micro/Nanotribology, 2nd edn. (CRC, Boca Raton 1999).
- /41/ B. Bhushan, V.N. Koinkar, J. Ruan: Microtribology of magnetic media, Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol. 208 (1994) 17-29.
- /42/ B. Bhushan, J.N. Israelachvili, U. Landman: Nanotribology: Friction, wear, and lubrication at the atomic scale, Nature 374 (1995) 607-616.

- /43/ V. Scherer, B. Bhushan, U. Rabe, W. Arnold: Local elasticity and lubrication measurements using atomic force and friction force microscopy at ultrasonic frequencies, *IEEE Trans. Mag.* 33 (1997) 4077-4079.
- /44/ B. Bhushan, S. Sundarajan: Micro/Nanoscale friction and wear mechanisms of thin films using atomic force and friction force microscopy, *Acta Mater.* 46 (1998) 3793-3804.
- /45/ B. Bhushan: *Micro/Nanotribology and its Applications* (Kluwer, Dordrecht 1997).
- /46/ B. Bhushan: *Principles and Applications of Tribology* (Wiley, New York 1999).
- /47/ B. Bhushan: *Modern Tribology Handbook Vol. 1: Principles of Tribology* (CRC, Boca Raton 2001).
- /48/ B. Bhushan: *Introduction to Tribology* (Wiley, New York 2002).
- /49/ N. A. Burnham, R.J. Colton: measuring the nanomechanical properties and surface forces of materials using an atomic force microscope, *J. Vac. Sci. Technol. A* 7 (1989) 2906 – 2913.
- /50/ P. Maivald, H. J. Butt, S.A.C. Gould, C. B. Prater, B. Drake, J.A. Gurley, V.B. Elings, P.K Hansma: Using force modulation to image surface elasticities with the atomic force microscope, *Nanotechnol.* 2 (1991) 103-106.
- /51/ B. Bhushan, A. V. Kulkarni, W. Bonin, J. T. Wyrobek: Nano/Picoindentation measurements using capacitive transducer in atomic force microscopy, *Philos. Mag. A* 74 (1996) 1117-1128
- /52/ B. Bhushan, V. N. Koinkar: Nanoindentation hardness measurements using atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 75 (1994) 5741-5746.
- /53/ D. DeVecchio, B. Bhushan: Localized surface elasticity measurements using an atomic force microscope, *Rev. Sci. Instrum* 68(1997) 4498-4505.
- /54/ S. Amelio, A.V. Goldade, U. Rabe, V. Scherer, B. Bhushan, W. Arnold: Measurementse of mechanical properties of ultra-thin diamond-like carbon coatings using atomic force acoustic microscopy, *Thin Solid Films* 392 (2001) 75-84.

- /55/ A. Majumdar, P.I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J.J. Graham, J. Alexander: Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope, *Appl. Phys. Lett.* 61 (1992) 2293-2295.
- /56/ B. Bhushan: Micro/Nanotribology and its applications to magnetic storage devices and MEMS, *Tribol. Ing.* 28 (1995) 85-96.
- /57/ L. Tsau, D. Wang, K.L. Wang: Nanometer scale patterning of silicon (100) surface by an atomic force microscope operating in air, *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 2133-2135.
- /58/ E. Delawski, B.A. Parkinson: Layer-by-layer etching of two-dimensional metal chalcogenides with the atomic force microscope, *J. Am. Chem. Soc.* 114 (1992) 1661-1667.