
SISTEMAS NANOECTROMECÁNICOS: ORIGEN, APLICACIONES Y DESAFÍOS

AGUSTÍN HERRERA-MAY, LUZ ANTONIO AGUILERA-CORTÉS,
ELÍAS MANJARREZ y MAX GONZÁLEZ-PALACIOS

RESUMEN

Se presenta una revisión sobre los sistemas nanoelectromecánicos (NEMS) considerando su origen, sus potenciales aplicaciones y los principales desafíos. Los NEMS tienen atributos fascinantes tales como el tamaño en la escala nanométrica, muy bajo consumo de potencia, alto factor de calidad, operación a altas frecuencias, alta sensibilidad y resolución. Estos atributos le permiten ser adecuados para gran cantidad de aplicaciones

tecnológicas tales como sensores ultra rápidos, actuadores, componentes de procesamiento de señales, nanomemorias y nanorobots. Sin embargo, los NEMS enfrentan importantes desafíos tecnológicos para lograr con éxito su optimización, una nanofabricación reproducible con alta resolución, altos factores de calidad, e integración con circuitos electrónicos.

Los sistemas nanoelectromecánicos (NEMS) son dispositivos que pueden contener elementos mecánicos, electromagnéticos, ópticos, térmicos y de fluidos con al menos una dimensión del orden de nanómetros (Rivas *et al.*, 2007). Los NEMS presentan características fascinantes que difieren de su antecesor, los sistemas microelectromecánicos (MEMS). Entre algunas de éstas características destacan su reducido tamaño, que permitirá la construcción de nanorobots para cirugía a nivel molecular (Freitas, 2005) y tratamientos de cáncer (Piña-García *et al.*, 2008), medir fuerzas con una resolución de ato-

newtons (1×10^{-18} N; Arlett *et al.*, 2006), detectar partículas con masas en la escala de zeptogramos (1×10^{-21} g; Yang *et al.*, 2006; Feng *et al.*, 2007), consumir potencias muy pequeñas del orden de atowatts (Roukes, 2000), operar a frecuencias muy altas hasta de gigahertz (1×10^9 Hz; Bargatin *et al.*, 2007; Drago-man *et al.*, 2008), y disponer de arreglos de nanocanales para obtener agua potable a partir de agua salada (Wang *et al.*, 2007), así como su potencial capacidad para crear memorias no volátiles más rápidas y con mayor capacidad de almacenamiento de datos (Wang *et al.*, 2005; Kang y Jiang, 2007). Por ende, los NEMS abren un abanico de

oportunidades para la fabricación de futuros dispositivos con un amplio rango de aplicaciones en áreas tales como la medicina, electrónica, mecánica, óptica, química, materiales y biotecnología.

Actualmente se lleva a cabo una exhaustiva investigación en el área de los NEMS, que ha sido precedida por el desarrollo de los MEMS en las últimas tres décadas (Villanueva *et al.*, 2008). Los MEMS han incrementado su presencia en diversas aplicaciones comerciales y con la microelectrónica se han realizado sistemas completos en un solo chip (Sedky, 2005). Las aplicaciones de MEMS han sido variadas, tales como sensores de gases

PALABRAS CLAVE / Actuadores / Nanoelectromecánica / Sensores /

Recibido: 05/06/2009. Aceptado: 03/02/2010.

Agustín Leobardo Herrera-May. Ingeniero Mecánico Eléctrico, Universidad Veracruzana (UV), México. Maestría en Ingeniería Mecánica y estudiante de Doctorado, Universidad de Guanajuato (UGTO), México. Investigador, UV, México. Dirección: Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana, Boca del Río, Ver., México. e-mail: leherrera@uv.mx

Luz Antonio Aguilera-Cortés. Licenciatura, Maestría y Doctorado en Ingeniería Mecánica, UGTO, México. Profesor Investigador, UGTO, México. e-mail: aguilera@salamanca.ugto.mx

Elías Manjarrez-López. Licenciatura en Física y Maestría en Ciencias Fisiológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México. Doctorado en Neurociencias, CINVESTAV, México. Profesor de Neurofisiología, BUAP, México. e-mail: emanjar@siu.buap.mx

Max Antonio González-Palacios. Ingeniero Mecánico Eléctrico, Universidad Iberoamericana, México. Maestría en Ingeniería Mecánica, UGTO, México. Ph.D., McGill University, Canadá. Profesor, UGTO, México. e-mail: maxg@salamanca.ugto.mx

(Bruschi *et al.*, 2008; Herrera-May *et al.*, 2007), sensores de campo magnético (Wang *et al.*, 2009; Herrera-May *et al.* 2009a, b), acelerómetros (Ravi-Sankar *et al.*, 2009; Herrera-May *et al.*, 2008), microespejos (Chaehoi y Berbie, 2008; Khatami y Rezazadeh, 2009) y sensores de presión (Damghanian y Majlis, 2009; Herrera-May *et al.* 2009c). En un futuro, los NEMS sustituirán a los MEMS en gran parte de estas aplicaciones y crearán nuevas alternativas para sensar variables hasta ahora no posibles. Por ende, los NEMS han despertado una enorme ilusión en el ámbito científico, militar y comercial, que es reflejado en el enorme apoyo económico en países del primer mundo para estudios en este campo.

En la próxima sección se reportan los eventos históricos que influyeron en el inicio de la nanotecnología y los NEMS.

Origen

Los NEMS forman parte de la nanotecnología, cuyo inicio, en su aspecto teórico, fue establecido en 1959 por el premio Nobel de física Richard Feynman en su magistral conferencia "There's plenty of room at the bottom" impartida en el Instituto Tecnológico de California (Feynman, 1992). En esa oportunidad expresó: "Los principios de la física, tal y como yo los entiendo, no niegan la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo... Los problemas de la química y la biología podrían evitarse si desarrollamos nuestra habilidad para ver lo que estamos haciendo y para hacer cosas al nivel atómico". De esta forma, Feynman hizo pública su visión de investigar en la escala atómica porque cosas sorprendentes podrían suceder tales como la miniaturización de computadoras, manipulación de átomos y construcción de máquinas a nivel molecular.

Posteriormente a la conferencia de Feynman, fue fabricado el primer dispositivo MEMS por Nathanson *et al.* (1967) de la empresa Westinghouse, en 1964. Este dispositivo consistió en un transistor de compuerta resonante accionado electrostáticamente. Después, en 1970 se inventó el microprocesador que contribuyó en las técnicas de litografía. Estas técnicas representaron un alto impacto sobre los métodos de fabricación de MEMS (Peleško y Berstein, 2002).

En 1982 fue desarrollado el microscopio de efecto túnel, que permitió que la visión futurista de Fe-

ynman se materializara. Este microscopio estaba conectado a una computadora en donde se podía visualizar y modificar los átomos como entidades independientes. A este microscopio continuó el desarrollo del microscopio de fuerza atómica en 1986.

Sumio Iijima (1991) descubrió los nanotubos de carbono (CNTs), los cuales son un subconjunto de la familia de las estructuras de fullerenos. Los CNTs están constituidos por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica y pueden ser de pared simple (SWCNT) o de pared múltiple (MWCNT). Los CNTs presentan una alta razón de aspecto (longitud/diámetro) e interesantes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas que le permiten ser materiales idóneos para los NEMS (Pugno, 2005). En 1994, Cleland y Roukes desarrollaron el primer dispositivo resonante NEMS, el cual consistió en una viga de silicio doblemente empotrada (Cleland y Roukes, 1996), y Dai *et al.* (1996) desarrollaron una técnica para producir CNTs de diámetro uniforme.

Ned Seeman (1997) inventó el primer dispositivo nanomecánico basado en el ADN. Dos años después, Reed y Tour (2000) crearon un conmutador computacional de escala molecular en una molécula aislada, y en 2001 la empresa IBM desarrolló un método para crecer CNTs. Wang *et al.* (2007) reportaron membranas de CNTs que actúan como un sistema de filtración ligero y económico que puede ayudar a filtrar pequeñas impurezas del agua dulce y desalinizar el agua de mar para obtener agua potable.

Watson *et al.* (2009) desarrollaron un micromotor con un diámetro de 250µm que puede ser utilizado en aplicaciones médicas. Este micromotor representa un avance significativo para que en un futuro se pueda desarrollar un nanomotor para el movimiento de nanorobots empleados en el monitoreo y suministro de medicamentos en el interior del cuerpo humano.

La mayor parte de los avances tecnológicos mencionados son una consecuencia de las visiones futuristas de Feynman, cuya influencia en el desarrollo de la nanotecnología y los NEMS ha sido crucial. A continuación se mencionan algunas potenciales aplicaciones de los NEMS.

Aplicaciones

Los NEMS generalmente tienen partes activas que consisten de vigas empotradas en un extremo o

vigas doblemente empotradas en la escala de nanómetros. Estas partes activas pueden estar formadas por materiales tales como Si, carburo de Si, CNTs, Pt y Au. De éstos, el Si es el material más estudiado en dispositivos NEMS; sin embargo, presenta una limitación para alcanzar altos factores de calidad. Los dos factores que más influyen en esta limitación del Si son el amortiguamiento termoelástico y los efectos superficiales como la oxidación superficial y reconstrucción (Changhong y Espinosa, 2005). Además, el Si presenta limitaciones en la resistencia y flexibilidad que afecta el funcionamiento de los NEMS. Por ende, nuevos materiales son necesarios para satisfacer las demandas de los dispositivos NEMS. Los CNTs son una opción muy viable para desarrollar NEMS, debido a que tienen una alta razón de aspecto, superficies perfectamente terminadas y excelentes propiedades mecánicas y eléctricas (Tomblor, *et al.*, 2000; Sapmaz *et al.*, 2002). También, los CNTs son susceptibles al ruido causado por fluctuaciones eléctricas, térmicas y químicas que los hacen adecuados para su utilización como sensores (Rivas *et al.*, 2007). Actualmente existen importantes avances en el conocimiento, manipulación y crecimiento de los CNTs que los perfilan en un futuro a ser el material de mayor uso en la fabricación de los NEMS. Hasta ahora, han sido reportados varios NEMS fabricados con CNTs (Kinaret *et al.*, 2003; Stampfer *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2007). Similar a los CNTs, las nanoestructuras de una dimensión conocidas como nanoalambres presentan otra alternativa para el desarrollo de los NEMS debido a su tamaño y propiedades eléctricas controlables, por ejemplo con un arreglo de nanoalambres alineados es posible desarrollar nanogeneradores (Wang, 2008). Estos materiales ayudan a los NEMS a tener importantes aplicaciones en el presente y en el futuro, las cuales se mencionan a continuación.

Sensores de masa

Generalmente los NEMS utilizados como sensores de masa consisten de un resonador formado por una viga empotrada en un extremo o una viga doblemente empotrada. Un cambio en la masa del resonador produce una alteración en su frecuencia de resonancia que puede ser detectado ópticamente o capacitivamente, como se muestra en la Figura 1. Los resonadores pueden ser accionados de forma térmica, magnética, piezoeléctrica o electrostática

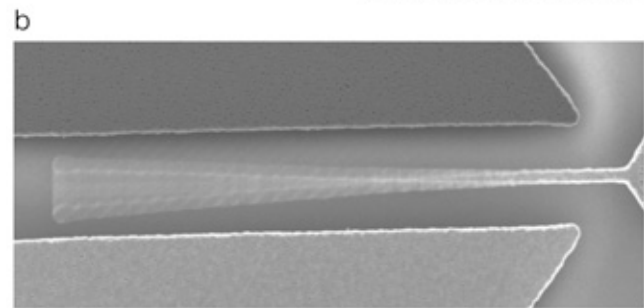
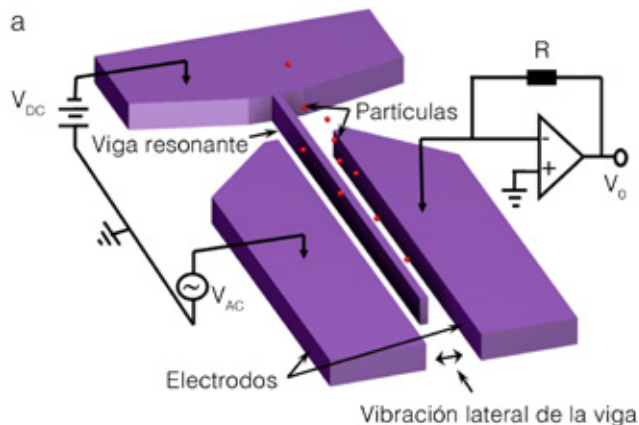


Figura 1. a: esquema del monitoreo de masa por medio de un resonador de silicio con vibración lateral, y b: SEM de un resonador de silicio con vibración lateral y con espesor en la escala nanométrica, el cual fue desarrollado por investigadores del Centro Nacional de Microelectrónica, de la Universidad Autónoma de Barcelona y de la Universidad Técnica de Dinamarca (Försen *et al.*, 2005).

(Cleland *et al.*, 2001; Hagleitner *et al.*, 2001; Forsen *et al.*, 2005) y tienen las ventajas de simplicidad y alta sensibilidad. El principio de la detección de

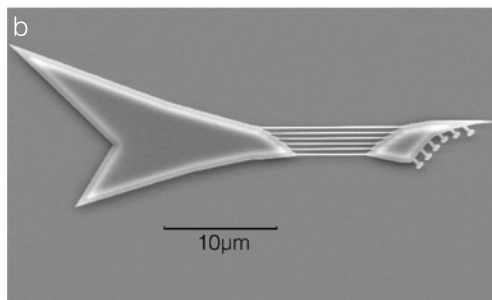
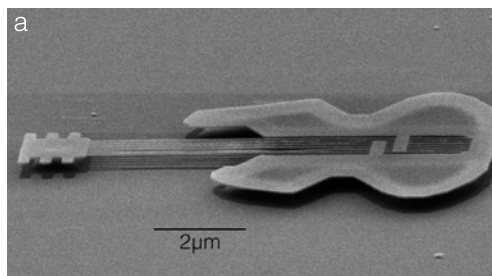


Figura 2. a: nanoguitarra *Fender Stratocaster* más pequeña del mundo, con un tamaño similar al glóbulo rojo sanguíneo, y b: nanoguitarra *Gibson Flying V* con un tamaño ~5 veces superior a la anterior. Estas nanoguitarras fueron desarrolladas por investigadores de la Universidad de Cornell (Cornell, 2009).

masa está basado en el monitoreo del cambio de la frecuencia de resonancia de la viga en función de la masa absorbida. Yang *et al.* (2006) desarrollaron un nanosensor de masa que alcanzó una resolución de 7 zeptogramos, lo cual es aproximadamente equivalente a 30 átomos de xenón.

Nanoguitarra

En 1997, investigadores de la Universidad de Cornell fabricaron la guitarra más pequeña del mundo con un diseño similar al modelo *Fender Stratocaster*, como se muestra en la Figura 2a. El tamaño de esta nanoguitarra tiene el mismo orden de magnitud que un glóbulo rojo sanguíneo. Seis años después, estos investigadores fabricaron y probaron un nuevo modelo de nano-

guitarra (Figura 3b) con la forma de una Gibson Flying V y con un tamaño ~5 veces superior a la primera nanoguitarra (Cornell, 2009). La segunda nanoguitarra fue fabricada mediante litografía de haz de electrones de alto voltaje y con grabado húmedo. Las cuerdas de esta nanoguitarra tienen barras de Si con secciones transversales de $150 \times 200 \text{ nm}$ cada una y longitudes de 6 a $12 \mu\text{m}$. Las cuerdas de la nanoguitarra fueron excitadas mediante un láser HeNe, el cual provocó oscilaciones resonantes en las cuerdas. Para escuchar la nanoguitarra, los investigadores usaron un fotodetector que detectó los patrones de interferencia en la luz reflejada de las cuerdas y el sustrato. Este patrón de interferencias fue convertido electrónicamente en tonos audibles. El diseño de las nanoguitarras permite entender mejor el funcionamiento de los NEMS. Dispositivos con operación similar a las nanoguitarras pueden ser utilizados en aplicaciones tales como osciladores de radio frecuencia de teléfonos celulares, en la detección química o biológica, en la modulación de la luz, en la detección de vibraciones que ayuden a localizar obje-

tos o identificar sonidos débiles para predecir fallas de maquinaria o estructuras.

Memoria de acceso aleatorio no volátil

Roukes *et al.* (2000) reportaron una memoria de acceso aleatorio no volátil basado en dispositivos electromecánicos formados con un arreglo de barras suspendidas de SWCNTs, como se muestra en la Figura 3. En la parte inferior de cada SWCNT existe un CNT con una separación del orden de 10 nm . Al aplicar una diferencia de potencial entre ellos se origina una fuerza electrostática mayor a la fuerza elástica del SWCNT que la flexiona hasta hacer contacto con el CNT inferior, lo cual simula el estado ON o el 1 lógico. Aunque se retire la fuerza electrostática, el SWCNT permanece unido al CNT inferior debido a la fuerza de van der Waals que permite a éstas memorias ser no volátiles. Para poder retirar esta unión es necesario aplicar una fuerza electrostática repulsiva entre el SWCNT y el CNT inferior, en donde la separación representa el estado OFF o el 0 lógico. Los dos estados OFF/ON pueden ser detectados fácilmente midiendo la resistencia de la unión. Estos dispositivos podrían ser usados para construir memorias RAM no volátiles con un nivel de integración de $\sim 10^{12}$ elementos/ cm^2 y una frecuencia de operación del orden de GHz. Sin embargo, el gran desafío de este dispositivo estriba en su proceso de fabricación para mantener arreglos paralelos de los SWCNTs con una distancia de separación a los CNTs de $\sim 10 \text{ nm}$.

Otro tipo de memoria RAM no volátil basado en CNTs fue propuesto por Kang y Jiang (2007). El diseño de esta nanomemoria consiste de MWCNTs que le permite tener tres estados lógicos (Figura 4). En la nanomemoria, los MWCNTs son depositados sobre un electrodo metálico y su principio de funcionamiento está basado en el movimiento telescópico de los MWCNTs. En ellos, un MWCNT es es-

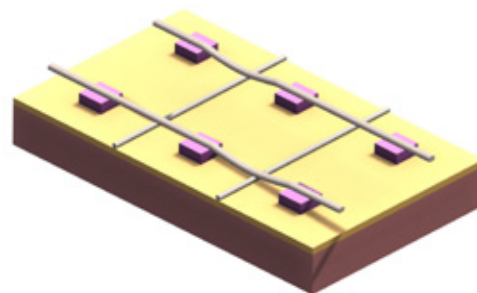


Figura 3. Esquema de la memoria RAM no volátil basado en CNTs propuesto por Roukes *et al.* (2000).

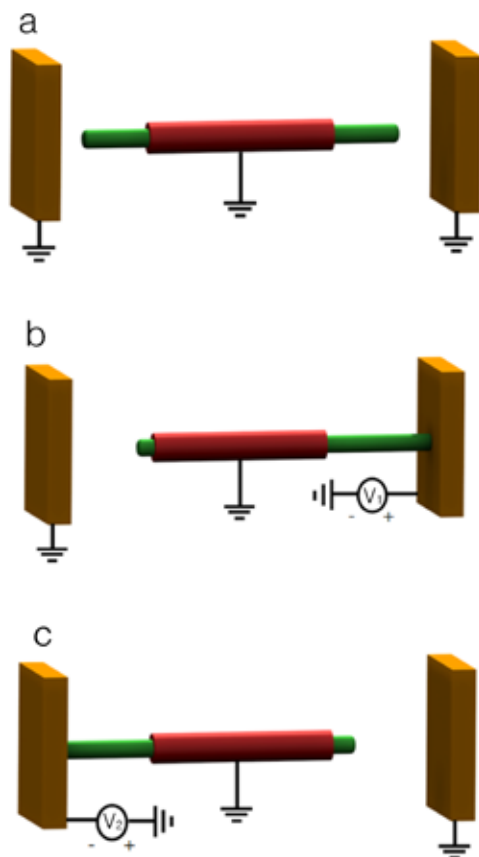


Figura 4. Diseño de una memoria no volátil basado en MWCNTs (Kang y Jiang, 2007). a: posición de equilibrio inicial, b: el MWCNT móvil está en contacto con el electrodo derecho con un potencial eléctrico V_1 , y c: el MWCNT móvil está en contacto con el electrodo izquierdo con un potencial eléctrico V_2 .

tacionario y en su interior se encuentra un MWCNT móvil con dos electrodos ubicados alrededor de los MWCNTs. Cuando el electrodo derecho es cargado positivamente y el MWCNT móvil es cargado negativamente, se genera una fuerza electrostática que atrae al MWCNT móvil hacia el electrodo derecho (Figura 4b). Si la energía de adhesión entre el electrodo y el MWCNT es mayor que la fuerza de van der Waals existente entre el MWCNT móvil y el estacionario, entonces el MWCNT permanecerá unido al electrodo derecho, aún cuando se retire el voltaje aplicado al electrodo, lo cual representa el estado 1. De forma similar, cuando el electrodo izquierdo es cargado negativamente y el MWCNT móvil es cargado positivamente, se genera una fuerza electrostática de atracción que atrae al MWCNT móvil hacia el electrodo izquierdo (Figura 4c). Si la energía de adhesión entre el MWCNT móvil y el electrodo izquierdo es superior a la fuerza de van der Waals, entonces permanecerán unidos aún si

se retira la fuerza electrostática. Si la fuerza de amortiguamiento es alta o no existe fuerza electrostática, entonces el MWCNT móvil permanecerá en reposo, condición que representa el 0 lógico.

Las memorias fabricadas con CNTs pueden ser una alternativa viable para fabricar memorias RAM no volátiles más rápidas, de menor costo, con gran capacidad de almacenamiento, mínimo consumo de potencia, resistentes a la radiación, y con vida casi ilimitada. Estas memorias no volátiles podrían ser utilizadas para reemplazar las memorias de los teléfonos celulares, de dispositivos MP3, de cámaras digitales y de PDAs (asistentes digitales personales).

Actualmente la empresa Nantero está construyendo un chip de memoria RAM no volátil basado en CNTs que ha llamado NRAM. Con este nuevo chip, la empresa espera reemplazar a las memorias DRAM, SRAM, memorias flash y discos duros de almacenamiento (Nantero, 2009).

Filtros

Dispositivos NEMS basados en CNTs pueden utilizarse como filtros para eliminar partículas suspendidas en fluidos. El tamaño nanométrico del diámetro de los CNTs permite el paso de fluidos por su interior y la retención de partículas suspendidas en el fluido. Esto abre el panorama a un conjunto de nuevas aplicaciones tales como celdas electroquímicas, biosensores y laboratorios en un chip.

Wang *et al.* (2007) reportó un arreglo de membranas de CNTs que podría utilizarse para obtener agua potable a partir de agua salada. Aunque los CNTs son hidrofóbicos, estos autores consiguieron que los CNTs dejaran de repeler gotas de agua mediante el ajuste e inversión de voltaje (Figura 5). El sistema consiste en aplicar un potencial positivo pequeño (1,7V) a las membranas de CNTs mientras a las gotas de agua se les aplica un potencial negativo. De esta forma, los CNTs no repelen el agua y le permiten fluir por sus interiores. Además, Wang *et al.* (2007) descubrieron que podrían controlar el índice de flujo del agua a través de los CNTs. Este descubrimiento es un avance muy importante para en un futuro obtener agua potable a partir de agua

salada mediante el control del flujo de agua a través de las membranas de CNTs. Además, estos dispositivos permitirán el desarrollo de capas de medicamentos que se liberarían en un tiempo determinado.

Nanorobótica

La nanorobótica es el estudio de la robótica en la escala nanométrica e incluye robots que tienen algunos componentes con tamaño menor a una micrómetro o presentan capacidad de manipulación de objetos con resolución nanométrica (Nelson *et al.*, 2008). La nanorobótica permitirá la realización de cirugías y tratamientos de algunos tipos de cáncer (Cavalcanti *et al.*, 2007c), detectar y remover obstrucciones en el sistema circulatorio (Cavalcanti *et al.*, 2008a), análisis médico (Cavalcanti, 2003), monitoreo de diabetes, terapias médicas (Cavalcanti *et al.*, 2007a), monitoreo ambiental y cuidado de la salud (Requicha, 2003).

Los NEMS y la nanoelectrónica serán la base fundamental para que en un futuro se desarrollen nanomáquinas integradas conocidas como nanorobots. Esto será posible gracias a los avances recientes de los NEMS, biosensores y nanoelectrónica

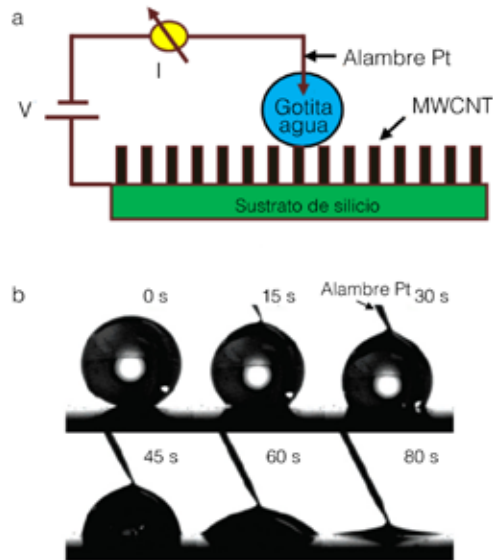


Figura 5. Efecto de la polarización positiva sobre la respuesta de una gota de agua. a: esquemático del arreglo de prueba donde una gota de agua desionizada ($\sim 2\mu\text{l}$) reposa sobre la superficie de una membrana de CNTs superhidrofóbicos y una punta de prueba de Pt es insertada en la gota para establecer contacto eléctrico; b: imágenes del cambio en la forma de la gota de agua al aplicar un voltaje de $+2,6\text{V}$ con una película de CNT como ánodo y el alambre de Pt como cátodo. La gota se introduce en la membrana del nanotubo en aproximadamente 90s (Wang *et al.*, 2007).

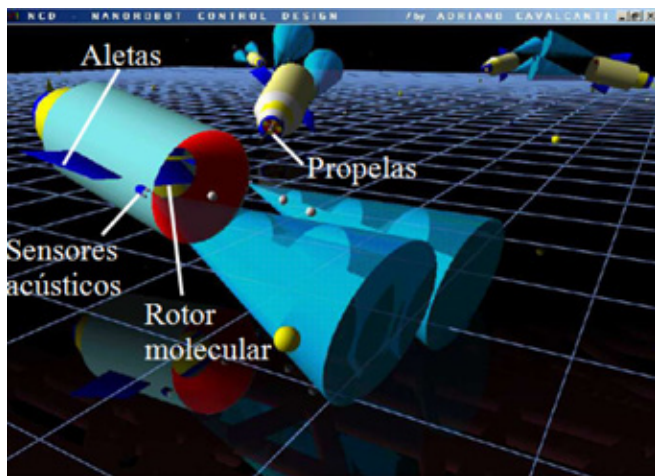


Figura 6. Nanorobots virtuales de seis grados de libertad con rotores moleculares, aletas, propelas y sensores para aplicaciones médicas (Cavalcanti *et al.*, 2008a).

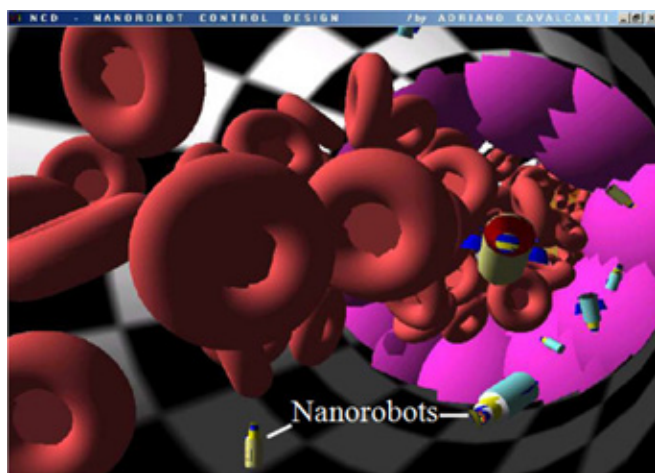


Figura 7. Modelo en 3D del flujo sanguíneo con nanorobots virtuales para liberación de fármacos e identificación de objetivos médicos (Cavalcanti *et al.*, 2005).

en la construcción de dispositivos tales como nanotransductores (Sun *et al.*, 2001; Calvacanti *et al.*, 2005), computación biomolecular (Lewin, 2001; Chan *et al.*, 2005) y motores biomoleculares (Bachand y Montemagno, 2000; Reuther *et al.*, 2006; Schmidt y Montemagno, 2006).

El desarrollo de los nanorobots es un campo emergente que se encuentra en un proceso exhaustivo de investigación. La simulación computacional de los nanorobots es una herramienta clave para la exploración de alternativas en la organización, configuración, planeación de movimiento y control de los nanorobots en el cuerpo humano (Cavalcanti, 2003; Cavalcanti y Freitas, 2005). En este campo, Adriano Cavalcanti *et al.* (2008a) han presentado trabajos sobre una innovadora arquitectura de hardware y simulación de nanorobots médicos usando

influencia dentro del cuerpo humano, basado sobre patrones de flujo de sangre y señales proteínicas (Cavalcanti *et al.*, 2008b). En las Figuras 6 y 7 se muestran el diseño de nanorobots de seis grados de libertad con rotores moleculares, aletas, propelas y sensores propuestos por ese grupo de investigadores (Cavalcanti, 2005; Cavalcanti *et al.*, 2008a) para aplicaciones médicas tales como la liberación de fármacos e identificación de objetivos médicos (Cavalcanti y Freitas, 2005).

Recientemente se han logrado avances significativos en el desarrollo de micromáquinas especialmente enfocados al área médica (Sendoh *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2003, 2008; Yamazaki *et al.*, 2005; Watson *et al.*, 2009). Entre éstos, Watson *et al.* (2009) crearon un microrobot controlado por un control remoto externo (Figura 8) que podría recorrer venas con

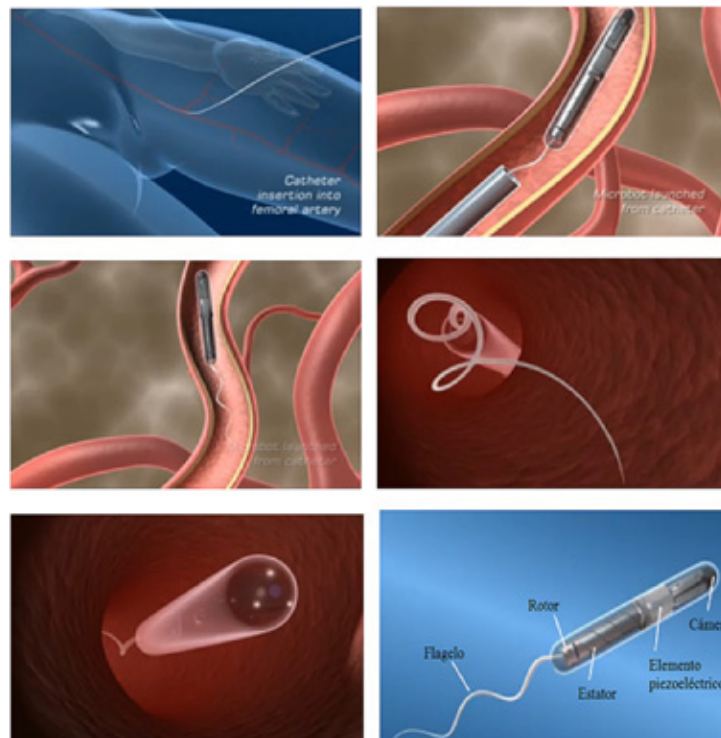


Figura 8. Imágenes del micromotor desarrollado por Watson *et al.* (2009) del laboratorio de micro/nanofísica de la Universidad de Monash, Australia. Este micromotor, con diámetro de 250µm, podría ser utilizado para monitoreo y cirugía médica (Microbot, 2009).

la nanobioelectrónica, datos clínicos y tecnologías inalámbricas para cirugías de cancer; además, como una herramienta precisa y avanzada para el diagnóstico e instrumentación de aneurismas cerebrales (Cavalcanti *et al.*, 2007b) y la detección de la

flujo sanguíneo no demasiado grande. El microrobot fue llamado Proteus y en un futuro podría transmitir imágenes, ayudar en las cirugías y suministro de medicamentos dentro del cuerpo humano. Este microrobot tiene un motor resonante ultrasónico piezoeléctrico que utiliza desplazamientos torsionales y axiales acoplados con un estator de corte helicoidal. Este diseño es una innovación muy importante y podría ser optimizado y reducido a la escala nanométrica en un futuro. En la Figura 9 se muestra una simulación de un nanorobot futurista diseñado por Yuriy Svidinenko (Nanotech, 2009).

Para lograr el éxito en las potenciales aplicaciones de los NEMS es necesario superar importantes desafíos que se mencionan en la siguiente sección.

Desafíos

Los NEMS enfrentan actualmente desafíos complicados para el desarrollo exitoso de sus potenciales aplicaciones en el futuro. Entre estos desafíos se encuentra la implementación de técnicas eficientes para la nanofabricación en grandes volúmenes, reproducibles y con alta resolución. Otro importante desafío que enfrentan los NEMS radica en los mecanismos de transducción, donde la transducción

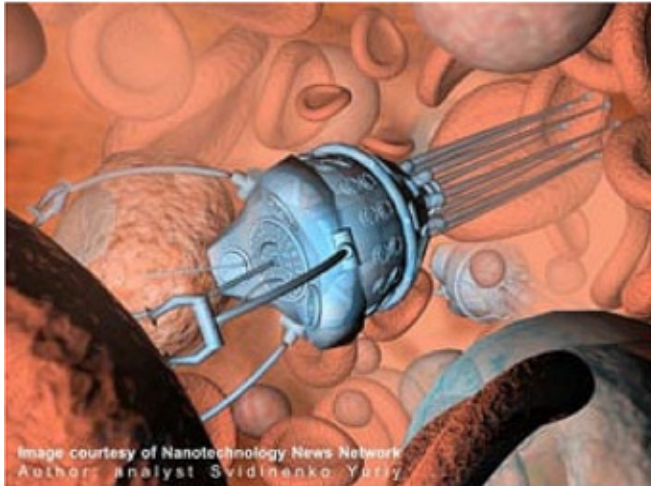


Figura 9. Imagen de un nanorobot futurista, diseñado por Svidinenko Yuriy, el cual realiza monitoreo en el interior de una arteria con flujo sanguíneo (Nanotech, 2009).

electrostática y óptica presentan algunos problemas. En la escala de los NEMS, la transducción electrostática tiene problemas porque la capacitancia entre los electrodos es del orden de $1 \times 10^{-18} \text{F}$ o aún más pequeños, lo cual puede ocasionar un dominio de las capacitancias parásitas sobre las capacitancias dinámicas de interés (Roukes, 2000).

Los métodos ópticos o la interferometría de fibra óptica, usadas para detectar la deflexión de vigas a escala nanométrica, presentan problemas debajo de su límite de difracción (Roukes, 2001a). Además, propiedades extrínsecas e intrínsecas limitan el factor de calidad en los dispositivos NEMS. Entre las características intrínsecas están los defectos en las interfaces y en el material y daños superficiales inducidos en la fabricación. Otro problema es el tamaño de los dispositivos NEMS comparados a los circuitos electrónicos, su extrema razón de superficie a volumen (Roukes, 2001b), y su rango no convencional de operación (Roukes, 2000). Además, es necesario desarrollar transductores de movimiento con alta sensibilidad y gran ancho de banda (Ekinci, 2005).

Un desafío muy importante de los dispositivos NEMS es su manipulación serial y empaquetado en la escala nanométrica (Lee et al., 2003, Murphy et al., 2007). Otro desafío de los NEMS basados en CNTs o nanoalambres consiste en alcanzar localizaciones deseadas con alta exactitud y alto rendimiento (Changhong y Espinosa, 2005). Para el caso de los nanorobots aplicados a la medicina, es necesario desarrollar una adecuada ar-

quitectura del hardware, que incluya los dispositivos necesarios para monitoreo de tumores, obstrucción vascular y anomalías en la salud del cuerpo humano (Murphy et al., 2007).

Para el desarrollo exitoso de los NEMS en un futuro es necesario realizar mayor investigación en los siguientes temas:

1- Niveles de integración extremadamente altos. Para aplicaciones tales como almacenamiento de datos y RAM, la densidad

de los componentes activos es un parámetro clave. El crecimiento y autoensamblaje directo son los dos métodos más prometedores para hacer dispositivos NEMS con niveles de integración de órdenes de magnitud más alta que aquellos de la microelectrónica (Changhong y Espinosa, 2005).

2- Mejor conocimiento del factor de calidad. Una de las claves para realizar potenciales aplicaciones de NEMS es lograr factores de calidad ultra elevados. Por ejemplo, para nanoresonadores la disipación, que es inversamente proporcional al factor de calidad, limita su sensibilidad a fuerzas aplicadas externamente y determina los niveles de potencia intrínsecos mínimos en que debe operar el dispositivo (Ekinci y Roukes, 2005). Sin embargo, el factor de calidad de resonadores decrece significativamente con el escalamiento del tamaño. Defectos en las interfaces de los materiales, daños superficiales inducidos en la nanofabricación y los amortiguamientos termoelásticos y de soporte son factores que pueden amortiguar el movimiento de resonadores.

3- Técnicas de nanofabricación. La nanofabricación en gran volumen, reproducible y de alta resolución es fundamental para garantizar en un futuro el éxito comercial de los NEMS. Por ejemplo, para futuros NEMS comerciales con capacidad de detección de masa en el rango de zeptogramos será necesaria la utilización de técnicas de nanofabricación de alta precisión y con capacidad de producción en gran volumen.

La superación de estos desafíos permitirán el éxito comercial

de los NEMS en aplicaciones tales como las industrias de la computación, la alimentación, la medicina, energía, textiles, militar, automotriz, construcción, deportes, y en el tratamiento de agua y residuos pesados. En este contexto se visualiza que los NEMS, junto a la nanoelectrónica y nanotecnología, proporcionarán dispositivos fascinantes que podrán ser capaces de propiciar cambios radicales para impulsar la prosperidad, la competitividad mundial e incluso incidir en el aspecto social. Sin embargo, la creación de estos nuevos dispositivos implica la necesidad de elaborar e implementar nuevas normas internacionales que regulen la fabricación, utilización, seguridad e higiene de estos futuros dispositivos. Tales normas ayudarán a evitar posibles problemas de contaminación, del uso inconsciente de los dispositivos, de la inadecuada operación por parte de los usuarios y, además, de la fabricación y distribución ilegal de los dispositivos que no cumplan las normas de seguridad e higiene. Por ende, antes de comercializar los nuevos dispositivos NEMS se tiene que realizar un enorme trabajo por parte de las autoridades gubernamentales para regular su fabricación, distribución y utilización.

Conclusiones

Los NEMS tienen propiedades únicas y útiles que pueden ser usadas para una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas, tales como la medicina, electrónica, comunicaciones y biotecnología. Los NEMS contribuirán en el desarrollo de nuevos y fascinantes dispositivos que influirán en el estilo y calidad de vida de las personas en un futuro. Sin embargo, antes deben superarse importantes desafíos, tales como lograr técnicas de nanofabricación reproducibles y de alta resolución, la integración eficiente de elementos mecánicos con componentes electrónicos en un sistema completo, el desarrollo de mecanismos eficientes para la actuación y detección de desplazamientos en la escala de nanómetros, la reducción de los costos de fabricación y la disminución de su amortiguamiento. Además, se deben elaborar e implementar nuevas normas para la regulación eficiente en la distribución y uso de los futuros dispositivos NEMS.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el proyecto

84605 de CONACYT y por el proyecto 099/2008 de DAIP de la Universidad de Guanajuato, México.

REFERENCIAS

- Arlett JL, Maloney JR, Gudlewski B, Muhluneh M, Roukes ML (2006) Self-sensing micro-and nanocantilevers with attoneuton-scale force resolution. *Nano Lett.* 6: 1000-1006.
- Bachand GD, Montemagno CD (2000) Constructing organic/inorganic devices powered by biomolecular motors. *Biomed. Microdev.* 2: 179-184.
- Bargatin I, Kozinsky I, Roukes ML (2007) Efficient electrothermal actuation of multiple modes of high-frequency nanoelectromechanical resonators. *Appl. Phys. Lett.* 90: 093116.
- Bruschi P, Nurra V, Piotta M (2008) A compact package for integrated silicon thermal gas flow meters. *Microsyst. Technol.* 14: 943-949.
- Cavalcanti A (2003) Assembly automation with evolutionary nanorobots and sensor-based control applied to nanomedicine. *IEEE Trans. Nanotechnol.* 2: 82-87.
- Cavalcanti A (2005) Robots in surgery. *Euro Nano Forum 2005: Nanotechnology Health EU Citizen in 2020*. Edinburgo, RU. 7 pp.
- Cavalcanti A, Freitas RA (2005) Nanorobotic control design: a collective behavior approach for medicine. *IEEE Trans. Nanobiosci.* 4: 133-140.
- Cavalcanti A, Hogg T, Kretly LC (2005) *Transducers Development for Nanorobotic Applications in Biomedical Engineering*. IEEE NDSI Nanoscale Devices System Integration. Houston, TX, EEUU.
- Cavalcanti A, Shirinzadeh B, Freitas RA, Kretly LC (2007a) Medical nanorobot architecture based on nanobioelectronics. *Rec. Pat. Nanotechnol.* 1: 1-10.
- Cavalcanti A, Shirinzadeh B, Fukuda T, Ikeda S (2007b) Hardware architecture for nanorobot application in cerebral aneurysm. *IEEE Nano 2007 Int. Conf. Nanotechnology*. Hong Kong, China.
- Cavalcanti A, Shirinzadeh B, Murphy D, Smith JA (2007c) Nanorobots for laparoscopic cancer surgery. *IEEE ICIS 2007 Int. Conf. Comp. Inform. Sci.* Melbourne, Australia.
- Cavalcanti A, Shirinzadeh B, Freitas RA, Hogg T (2008a) Nanorobot architecture for medical target identification. *Nanotechnology* 19: 015103.
- Cavalcanti A, Shirinzadeh B, Zhang M, Kretly LC (2008b) Nanorobot hardware architecture for medical defense. *Sensors* 8: 2932-2958.
- Chaehoi A, Berbie M (2008) Study of a piezoelectric multimorph based microscanner. *Microsyst. Technol.* 14: 963-969.
- Chan WL, Guo M, Ho MSH (2005) Fast parallel molecular algorithms for DNA-based computation: factoring integers. *IEEE Trans. Nanobiosci.* 4: 149-163.
- Changhong K, Espinosa HD (2005) Nanoelectromechanical Systems and Modeling. En Rieth M, Schommers W (Eds.) *Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology*. Vol. 1, Ch. 121. American Scientific. Stevenson Ranch, CA, EEUU. 38 pp.
- Clelland AN, Roukes ML (1996) Fabrication of high frequency nanometer scale mechanical resonators from bulk Si crystals. *Appl. Phys. Lett.* 69: 2653-2655.
- Clelland AN, Pophristic N, Fergurson I (2001) Single-crystal aluminum nitride nanomechanical resonators. *Appl. Phys. Lett.* 79: 2070-2072.
- Cornell (2009) www.news.cornell.edu/releases/Nov03/NEMSGuitar.ws.html (Cons. 30/03/2009).
- Dai H, Hafner JH, Rinzler AG, Colbert DT, Smalley RE (1996) Nanotubes as nanoprobes in scanning probe microscopy. *Nature* 384: 147-150.
- Damghanian M, Majlis BY (2009) Analysis and design of a wide micro beam as a pressure gauge for high sensitivity MEMS fingerprint sensors. *Microsyst. Technol.* 15: 731-737.
- Dragoman D, Dragoman M, Müller AA (2008) Graphene-a one-atom-thick material for microwave devices. *Rom. J. Inf. Sci. Technol.* 11: 29-35.
- Ekinci KL (2005) Electromechanical transducers at the nanoscale: actuation and sensing of motion in nanoelectromechanical systems (NEMS). *Small* 1: 786-797.
- Ekinci KL, Roukes ML (2005) Nanoelectromechanical systems. *Rev. Sci. Instr.* 76: 061101.
- Feng XL, He R, Yang P, Roukes ML (2007) Very high frequency silicon nanowire electromechanical resonators. *Nano Lett.* 7: 1953-1959.
- Feynman RP (1992) There's plenty of room at the bottom. *J. Microelectromech. Syst.* 1: 60-66.
- Forsen E, Abadal G, Ghatnekar-Nilsson S, Teva J, Verd J, Sandberg R, Svendsen W, Pérez-Murano F, Esteve J, Figueras E, Campabadal F, Montelius L, Barniol N, Boisen A (2005) Ultrasensitive mass sensor fully integrated with complementary metal-oxide-semiconductor circuitry. *Appl. Phys. Lett.* 87: 043507.
- Freitas RA (2005) Current status of nanomedicine and medical nanorobotics. *J. Comput. Theor. Nanosci.* 2: 1-25.
- Guo S, Fukuda T, Asaka K (2003) A new type of fish-like underwater microrobot. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 8: 136-141.
- Guo S, Pan Q, Khamesse MB (2008) Development of a novel type of microrobot for biomedical application. *Microsyst. Technol.* 14: 307-314.
- Hagleitner C, Hierlemann A, Lange D, Kummer A, Kerness N, Brand O, Baltes H (2001) Smart single-chip gas sensor microsystem. *Nature* 414: 293-296.
- Herrera-May AL, Martínez-Castillo J, García-Ramírez PJ, García-González L (2007) Microsensores de gas: detección de partículas. *Cienc. Hombre* 20: 37-42.
- Herrera-May AL, Cortés-Pérez AR, Aguilera-Cortés LA (2008) Los microacelerómetros en la actualidad. *Acta Univ.* 18: 24-32.
- Herrera-May AL, Aguilera-Cortés LA, García-González L, Figueras-Costa E (2009a) Mechanical behavior of a novel resonant microstructure for magnetic applications considering the squeeze-film damping. *Microsyst. Technol.* 15: 259-268.
- Herrera-May AL, García-Ramírez PJ, Aguilera-Cortés LA, Martínez-Castillo J, Saucedo-Carvajal A, García-González L, Figueras-Costa E (2009b) A resonant magnetic field microsensor with high quality factor at atmospheric pressure. *J. Micromech. Microeng.* 19: 015016.
- Herrera-May AL, Soto-Cruz BS, López-Huerta F, Aguilera-Cortés LA (2009c) Electromechanical analysis of a piezoresistive pressure microsensor for low-pressure biomedical applications. *Rev. Mex. Fis.* 55: 14-24.
- Iijima S (1991) Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354: 56-58.
- Kang JW, Jiang Q (2007) Electrostatically telescoping nanotube nonvolatile memory device. *Nanotechnology* 18: 095705.
- Khatami F, Rezazadeh G (2009) Dynamic response of a torsional micromirror to electrostatic force and mechanical shock. *Microsyst. Technol.* 15: 535-545.
- Kinaret J, Nord T, Viefers S (2003) A carbon-nanotube-based nanorelay. *Appl. Phys. Lett.* 82: 1287-1289.
- Lee YC, Parviz BA, Chiou JA, Chen S (2003) Packaging for microelectromechanical and nanoelectromechanical systems. *IEEE Trans. Adv. Pack.* 26: 217-226.
- Lewin DI (2001) Beyond the wall: computing with molecules. *Comput. Sci. Eng.* 3: 17-20.
- Microbot (2009) http://www.iop.org/Media/Press%20Releases/press_32489.html (Cons. 13/04/2009).
- Murphy D, Challacombe B, Nedas T, Elhage O, Althoefer K, Seneviratne L, Dasgupta P. (2007) Equipment and technology in robotics. *Arch. Esp. Urol.* 60: 351-355.
- Nanotech (2009) www.nanotech-now.com/Art_Gallery/svidinenko-yuriy.htm (Cons. 21/04/2009).
- Nantero (2009) www.nantero.com/mission.html (Cons. 22/04/2009).
- Nathanson HC, Newell WE, Wickstrom RA, Davis JR (1967) The resonant gate transistor. *IEEE Trans. Electron. Dev.* 14: 117-133.
- Nelson BJ, Dong L, Arai F (2008) Micro/Nanorobots. En Siciliano B, Khatib O (Eds.) *Springer Handbook of Robotics*. Springer. Heidelberg, Alemania. pp. 411-450.
- Pelesko JA, Berstein DH (2002) *Modeling MEMS and NEMS*. Chapman Hall/CRC. Boca Raton, FL, EEUU. 390 pp.
- Piña-García CA, Rechy-Ramírez EJ, García-Vega VA (2008) MICAI 2008: Advances in artificial intelligence. En Gelbukh A, Morales EF (Eds.) *Comparing Three Simulated Strategies for Cancer Monitoring with Nanorobots*. Springer. Heidelberg, Alemania. pp. 1020-1030.
- Pugno S (2005) Tunneling current-voltage controls, oscillations, and instability of nanotube-and nanowire-based nanoelectromechanical systems. *Glass Phys. Chem.* 31: 535-544.

- Ravi-Sankar A, Das S, Lahiri SK (2009) Cross-axis sensitivity reduction of a silicon MEMS piezoresistive accelerometer. *Microsyst. Technol.* 15: 511-518.
- Reed MA, Tour JM (2000) Computing with molecules. *Scientific American* 283: 86-93.
- Requicha AAG (2003) Nanorobots, NEMS and Nanoassembly. *Proc. IEEE* 91: 1922-1933.
- Reuther C, Hajdo L, Tucker R, Kasprzak AA, Diez S (2006) Biotemplated nanopatterning of planar surfaces with molecular motors. *Nano Lett.* 6: 2177-2183.
- Rivas MJ, Román J, Cosme ML (2007) *Informe de Vigilancia Tecnológica: Aplicaciones Actuales y Futuras de los Nanotubos de Carbono*. Fundación Madrid para el Conocimiento 70. Madrid, España. 149 pp.
- Roukes ML (2000) Nanoelectromechanical systems. *Tech. Digest of the 2000 Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, (Hilton Head Island), p. 1.
- Roukes ML (2001a) Nanoelectromechanical systems face the future. *Phys. World* 14: 25-31.
- Roukes ML (2001b) Plenty of Room Indeed. *Scientific American* 285: 48-57.
- Roukes T, Kim K, Joselevich E, Tseng GY, Cheung CL, Lieber CM (2000) Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing. *Science* 289: 94-97.
- Sapmaz S, Blanter YM, Gurevich L, van der Zant HSJ (2002) Carbon nanotubes as nanoelectromechanical systems. *Phys. Rev. B* 67: 235414.
- Sedky S (2005) *Post-processing Techniques for Integrated MEMS*. Artech House. Norwood, MA, EEUU. 234 pp.
- Seeman NC (1997) DNA components for molecular architecture. *Acc. Chem. Res.* 30: 357-363.
- Schmidt J, Montemagno C (2006) Introduction to nanoscale science and technology. En Di Ventra M, Evoy S, Heflin JR (Eds.) *Biomolecular Motors*. Springer. Boston, MA, EEUU. 632 pp.
- Sendoh M, Ishiyama K, Arai KI, Jojo M, Sato F, Matsuki H (2002) Fabrication for magnetic micromachine for local hyperthermia. *IEEE Trans. Magn.* 38: 3359-3361.
- Stampfer C, Jungen A, Linderman R, Obergfell D, Roth S, Hierold C (2006) Nano-electromechanical displacement sensing based on single walled carbon nanotubes. *Nano Lett.* 6: 1449-1453.
- Sun J, Gao M, Feldmann F (2001) Electric field directed layer-by-layer assembly of highly fluorescent CdTe nanoparticles. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 1: 133-136.
- Tombler TW, Zhou CW, Alexseyev L, Kong J, Dai HJ, Lei L, Jayanthi CS, Tang MJ, and Wu SY (2000) Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation. *Nature* 405: 769-772.
- Villanueva G, Arcamone J, Abadal G, Nicu L, Pérez-Murano F, Van der Zant H, Andreucci P, Hierold C, Brugger J (2008) Nanoelectromechanical systems (NEMS). *E-nano Newslett.* 8: 5-17.
- Wang ZL (2008) Energy harvesting for self-powered nanosystems. *Nano Res.* 1: 1-8.
- Wang S, Sellin P, Zhang Q, Yang D (2005) Non-volatile memory from single-walled carbon nanotube-based field effect transistors. *Curr. Nanosci.* 1: 43-46.
- Wang Z, Ci L, Chen L, Nayak S, Ajayan PM, Koratkar N (2007) Polarity-dependence electrochemically controlled transport of water through carbon nanotube membranes. *Nano Lett.* 7: 697-702.
- Wang Y, Lou W, Fan N, Hao J, Zhang D (2009) Study on fault diagnostic strategy of intelligent magnetic detection. *Microsyst. Technol.* 15: 89-94.
- Watson B, Friend J, Yeo L (2009) Piezoelectric ultrasonic resonant motor with stator diameter less than 250 μm : the Proteus motor. *J. Micromech. Microeng.* 19: 022001.
- Yamazaki A, Sendoh M, Ishiyama K, Arai KI (2005) Wireless magnetic micromachine of planar structure with magnetic thin film. *IEEE Trans. Magn.* 41: 4021-4023.
- Yang YT, Callegari C, Feng XL, Ekinci KL, Roukes ML (2006) Zeptogram-scale nanomechanical mass sensing. *Nano Lett.* 6: 583-586
- Yang X, Zhao-Ying Z, Ying W, Jin Z, Ying-Ying Z (2007) A carbon nanotube-based sensing element. *Optoelectron. Lett.* 3: 81-84.

NANOELECTROMECHANICAL SYSTEMS: ORIGIN, APPLICATIONS AND CHALLENGES

Agustín Herrera-May, Luz Antonio Aguilera-Cortés, Elías Manjarrez and Max González-Palacios

SUMMARY

A review of nanoelectromechanical systems (NEMS) considering the origin, potential applications and main challenges is presented. The NEMS possess fascinating attributes such as their nanoscale size, ultra-low power consumption, high quality factor, operability at high frequencies, high sensitivity and resolution. Thanks to these attributes, NEMS can be adapted for many tech-

nological applications such as ultra-fast sensors, actuators, components for signal processing, nanomemories and nanorobots. However, the NEMS have important technological challenges to achieve their optimization, a reproducible and high-resolution nanofabrication, high quality factors, and integration with electronic circuits.

SISTEMAS NANOELECTROMECÂNICOS: ORIGEM, APLICAÇÕES E DESAFIOS

Agustín Herrera-May, Luz Antonio Aguilera-Cortés, Elías Manjarrez e Max González-Palacios

RESUMO

Apresenta-se uma revisão sobre os sistemas nanoelectromecânicos (NEMS) considerando sua origem, suas potenciais aplicações e os principais desafios. Os NEMS apresentam atributos fascinantes tais como o tamanho na escala nanométrica, muito baixo consumo de potência, alto fator de qualidade, operação a altas frequências, alta sensibilidade e resolução. Estes atributos lhe permitem ser adequados para grande quantidade de aplica-

ções tecnológicas tais como sensores ultra rápidos, atuadores, componentes de processamento de sinais, nanomemórias e nanorobots. No entanto, os NEMS enfrentam importantes desafios tecnológicos para conseguir com sucesso sua otimização, uma nanofabricação reproduzível com alta resolução, altos fatores de qualidade, e integração com circuitos eletrônicos.