

Estructuras, dispositivos y sistemas nanoelectromecánicos (NEMS)

Los recientes avances en tecnologías de estructuración de materiales han permitido alcanzar un elevado control en la fabricación a escala nanométrica de estructuras y dispositivos mecánicos. Una estructura nanomecánica es aquella que puede realizar un determinado movimiento (oscilación periódica, deflexión, deformación) de manera que las propiedades esenciales de tal movimiento se deben a que al menos una de las dimensiones características de la estructura se encuentra en la escala nanométrica (1-100 nm). Las propiedades nanomecánicas más básicas de cualquier nanoestructura son las relativas a su elasticidad (rigidez, plasticidad, etc.) y resonancia mecánica (frecuencia de resonancia, factor de calidad, etc.).

Un dispositivo o sistema nanoelectromecánico (NEMS, Nanoelectromechanical Systems) es aquel que mediante la conversión del movimiento de una estructura nanomecánica en una señal eléctrica aprovecha las propiedades nanomecánicas de la estructura para el desarrollo de una determinada funcionalidad como, por ejemplo, la medida de magnitudes físicas, la detección de partículas o el procesamiento de señales. La fabricación de NEMS a escala cada vez menor es un campo de gran interés en nanotecnología, pues ello puede permitir el desarrollo de dispositivos con nuevas funcionalidades que se aproximen a los límites de la mecánica clásica.

La estructura mecánica más sencilla de fabricar mediante técnicas litográficas (aproximación *top-down*) es un fleje. Su utilización más extendida la encontramos en el campo de la microscopía de fuerzas atómicas, donde se utilizan como transductores de la fuerza detectada por una punta muy afilada integrada en el fleje. Igualmente sencillo de realizar es un puente, es decir, un fleje anclado por los dos extremos, que presenta una rigidez y frecuencia de resonancia mayores.

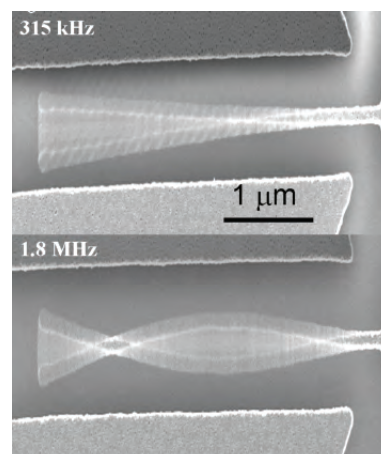
La utilización práctica de estructuras (nano)mecánicas requiere de métodos eficientes de transducción de su movimiento en una señal eléctrica. El método más sensible es la detección óptica, en el cual se hace incidir un haz de luz láser sobre la estructura y se detecta el cambio en el ángulo de incidencia, o el cambio del patrón

interferométrico. La detección óptica tiene límites en cuanto a capacidad de integración y para su utilización en estructuras especialmente pequeñas. La alternativa la constituye la detección eléctrica, que puede ser capacitiva magnetométriz, piezoresistiva o piezoelectrónica.

Los dispositivos basados en flejes y puentes basan su funcionamiento en modos de vibración flexurales. Un concepto distinto son los resonadores nanomecánicos basados en modos acústicos, como los resonadores de radiofrecuencia constituidos por discos en los cuales la vibración es radial, o los basados en oscilaciones en el espesor de membranas piezoelectrónicas. Estos dispositivos alcanzan frecuencias de resonancia extremadamente altas (en el rango de GHz) y la transducción de tales vibraciones se basa en la detección capacitiva.

Los métodos de fabricación *bottom-up*, en los que las estructuras nanomecánicas se ensamblan a partir de procesos de síntesis, representan una alternativa de creciente interés para el desarrollo de NEMS. Los nanotubos de carbono y los nanohilos de Si son ejemplos paradigmáticos de nanoestructuras *bottom-up*. Estas nanoestructuras no solo tienen dimensiones muy inferiores a los límites de resolución habituales en métodos *top-down*, sino que además presentan unas características estructurales únicas, que les confieren unas propiedades electromecánicas excepcionales.

La síntesis de nanohilos de Si mediante el mecanismo vapor-liquido-sólido (VLS) es uno de los métodos de crecimiento de nanohilos más interesantes para NEMS. El diámetro de los nanohilos va desde los centenares a unos pocos nanómetros, y su longitud puede ser arbitrariamente larga. Su interés para NEMS radica en dos aspectos: en primer lugar, en su reducida masa, elevada rigidez y calidad estructural, así como su extraordinario comportamiento piezoresistivo (gran cambio de su resistividad bajo la aplicación de tensión mecánica); por otra parte, la síntesis por VLS se puede combinar con métodos de fabricación *top-down* para proporcionar un control muy preciso de estas propiedades y para habilitar la fabricación a gran escala.



→ Imágenes de microscopía electrónica de un fleje nanomecánico de silicio excitado electrostáticamente en el primer modo de resonancia (imagen superior) y en el segundo modo de resonancia (imagen inferior). Zachary Davis