

Sistema de microscopía de fuerza atómica basada en una unidad de lectura óptica digital y un escáner-zumbador

Reza Dabirian^{a,b}, Wei-Min Wang^{c,d}, David Loza Matovelle^a y En-Te Hwu^{c,*}

^aDepartamento de Ciencias de la Energía y Mecánica,

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador.

^bLaboratorio de Nuevos Materiales, Departamento de Materiales,

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

^cInstitute of Physics, Academia Sinica, Taipei, 11529, Taiwan.

*e-mail: whoand@gmail.com

^dDepartment of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, 10617, Taiwan.

Received 10 March 2015; accepted 14 April 2015

En este artículo se presenta un sistema de detección astigmático (ADS), basada en una unidad de lectura óptica digital (OPU) del disco compacto (CD/DVD). Este sistema de detección astigmático puede alcanzar una resolución mejor que 0.3 nm en la detección del desplazamiento vertical y se puede detectar la inclinación angular de dos dimensiones de la superficie del objeto. También, se ha presentado un novedoso diseño para un escáner-zumbador. El escáner se compone de una estructura de accionamiento de cuatro-barras y varios zumbadores piezoeléctricos de disco. El escáner-zumbador se puede accionar con voltajes bajos como los de las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) y permite un alcance de barrido suficiente de hasta 15 μm . Por lo tanto, el costo de construir un AFM puede reducirse significativamente juntando las dos técnicas. A partir de las dos técnicas anteriores, se construyó un AFM económico de alto rendimiento, utilizando el escáner-zumbador para mover la muestra y un OPU para detectar la resonancia mecánica de un cantiléver microfabricado. Evaluamos el desempeño del AFM. La alta sensibilidad y gran ancho de banda del sistema de detección hace que el equipo sea apropiado para la caracterización de elementos a escala nanométrica. Un AFM usando nuestro sistema de detección para detectar la deflexión del cantiléver microfabricado, puede resolver pasos atómicos individuales en superficies de grafito.

Descriptores: Microscopía de fuerza atómica (AFM); nano-metrología; unidad lectura digital de DVD; escáner-zumbador.

An astigmatic detection system (ADS) based on a compact disk/digital-versatile-disk (CD/DVD) astigmatic optical pickup unit (OPU) is presented. It can achieve a resolution better than 0.3 nm in detection of the vertical displacement and is able to detect the two-dimensional angular tilt of the object surface. Furthermore, a novel scanner design actuated by piezoelectric disk buzzers is presented. The scanner is composed of a quad-rod actuation structure and several piezoelectric disks. It can be driven directly with low-voltage and low-current sources, such as analogue outputs of a data acquisition (DAQ) card and enables a sufficient scanning range of up to 15 μm . In addition, an economic, high-performance streamlined atomic force microscope (AFM) was constructed, using the buzzer-scanner to move the sample relative to the probe, and using a CD/DVD OPU to detect the mechanical resonance of a microfabricated cantilever. The performance of the AFM is evaluated. The high sensitivity and high bandwidth of the detection system makes the equipment suitable for characterizing nanoscale elements. An AFM using our detection system for detecting the deflection of microfabricated cantilevers can resolve individual atomic steps on graphite surfaces.

Keywords: Atomic force microscopy (AFM); nano metrology; optical DVD pick-up head; buzzer-scanner.

PACS: 07.79.Lh; 68.37.Ps.

1. Introducción

La microscopía de sonda de barrido (SPM) [1] y la microscopía de fuerza atómica (AFM) [2] se han aplicado a una amplia variedad de campos para la captura de imágenes y medición a escala nanométrica. Las aplicaciones van desde la física, ingeniería, ciencias de la vida, hasta el desarrollo de procesos y control. A través, de una mejora progresiva a largo plazo, los AFMs se han convertido en una herramienta de la nanotecnología accesible y fácil de usar para el estudio de las propiedades físicas de las superficies de materiales [3]. Por tanto, es altamente deseable reducir el costo de estos instrumentos de precisión, de modo que el AFM puede convertirse en una herramienta común de laboratorio, como es el microscopio óptico. Sin embargo, los AFMs comerciales actuales son caros debido a los altos costos de su construcción.

Un gasto significativo surge por el módulo complejo de detección óptico, utilizado para medir las deflexiones a escala nanométrica de un cantiléver microfabricado. Un módulo óptico utilizando el método de detección de desviación del haz de láser puede costar más de US \$ 5.000. En los últimos años se ha demostrado que unidades ópticas de lectura, abreviada OPU (del inglés Optical Pick-up Unit) del disco compacto (CD/DVD) pueden medir los desplazamientos subatómicos de una sonda de AFM [4-7]. Los OPUs suelen adoptar una trayectoria óptica astigmática - el tamaño del punto de detección puede ser menor que 1 μm , y el ancho de banda de medida puede llegar a más de 60 MHz. El OPU comercial pesa aproximadamente 20 gramos o menos y cuesta menos de US \$ 30. Un AFM comercial modificado con una OPU para la detección de la resonancia del cantiléver muestra una calidad de imagen equivalente a la obtenida con el módulo comercial de desviación del haz de láser [5,6].

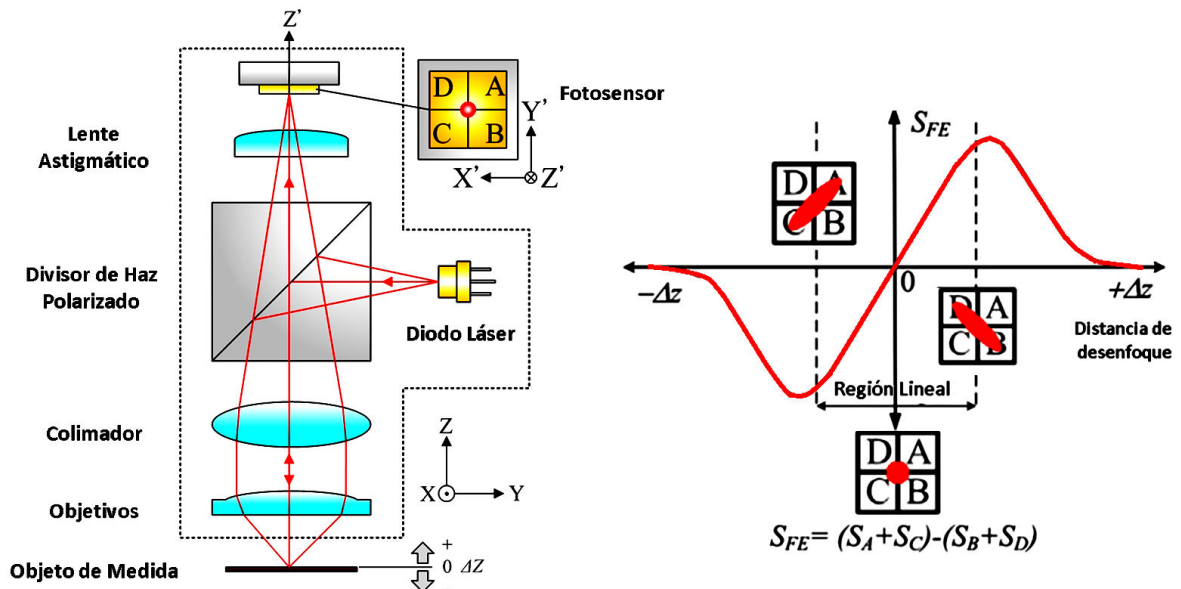


FIGURA 1. (a) Diagrama esquemático de la trayectoria óptica astigmática típica. Los ejes $X - Y - Z$ son definidos a la posición de la superficie del objeto con el eje Z como el eje óptico del haz de láser. Los ejes $X' - Y' - Z'$ son definidos en la posición del fotosensor. (b) S_{FE} frente a la distancia de desenfoque. El punto de luz correspondiente proyectada en el fotosensor muestra tres distancias diferentes de desenfoque.

Otro gasto surge con el escáner, así como la electrónica que controla el escáner para el posicionamiento de precisión de la muestra relativa a la sonda y para el escaneo de alta resolución en movimiento. Varios tipos de escáneres se utilizan actualmente en AFMs. Un escáner de tubo piezoeléctrico [8] se adopta con mayor frecuencia en AFMs debido a su diseño simple y compacto. El escáner de tubo está hecho de un material cerámico delgado y frágil y puede ser fácilmente roto por cargas pesadas, impacto mecánico, o impulsos de alta tensión. Un tubo de escáner cuesta más de US \$ 1000. Este tipo de escáner necesita ser controlado por un amplificador de bajo ruido y alta tensión (± 200 V) que también es bastante caro. Además, se requieren calibraciones frecuentes o instalación de sensores de retroalimentación para mediciones de alta calidad en estos sistemas de AFM.

En este trabajo, se demuestra que el sistema de detección astigmático, abreviada ADS (del inglés Astigmatic Detection System) que es utilizado en la mayor parte de los discos compactos CD/DVD y memorias ROM [9-11] puede detectar simultáneamente el desplazamiento vertical y la inclinación de dos dimensiones angulares en una posición local del cantiléver microfabricado con una alta sensibilidad y un gran ancho de banda. También se presentan un nuevo diseño para un escáner de bajo voltaje piezoeléctrico con un área de escaneo suficiente. Una estructura de cuatro-barras que contiene múltiples discos zumbadores piezoeléctricos resulta en una rigidez favorable para el sistema. Se evalúa las frecuencias de resonancia de este escáner-zumbador y se lo compara con un escáner de tubo. Combinando estas técnicas hemos construido un nuevo tipo de AFM, que utiliza este escáner-zumbador y el sistema ADS para la detección de movimientos del cantiléver.

2. Resultados

2.1. Sistema de detección astigmático

Los métodos actuales de detección de movimientos del cantiléver miden el desplazamiento vertical en una sola dimensión (por ejemplo, la interferometría láser [12,13] y la medición de capacitancia [14]) o los desplazamientos angulares en 1D/2D (por ejemplo, método de deflexión de haz de láser [15]) que se han adoptado con éxito en un AFM y sistemas micro- o nanoelectromecánicos (MEMSs y NEMSs) basados en sensores químicos/biológicos.

La Fig. 1(a) ilustra la típica trayectoria óptico astigmática que se puede encontrar en muchos cabezales ópticos de CD/DVD. Un haz de láser emitido desde un diodo es primero colimado y luego enfocado sobre una superficie por un objetivo. El haz reflejado desde la superficie del objeto se dirige entonces a través de las lentes y después de pasar a través de un elemento astigmático (tal como una lente cilíndrica o una placa de vidrio inclinada) incide en un fotodetector integrado, abreviada PDIC (del inglés Photo Detector Integrated Chip). El centro del PDIC se compone de cuatro fotosensores (A, B, C, D) con un preamplificador de corriente para cada uno de ellos. El elemento astigmático es un dispositivo de haz conformado. Como se muestra en la Fig. 1(b), cuando la superficie del objeto está perfectamente enfocado en el punto del haz de láser (distancia de desenfoque $z = 0$), el punto de luz proyectado sobre los fotosensores es circular; cuando la superficie es ligeramente cercano o alejado al punto de enfoque del haz de láser, el punto de luz se vuelve más alargado con el eje de la marca en la longitud de la dirección de AC o DB, respectivamente. El cambio de forma del punto de luz

puede ser detectado con la señal de error de enfoque (S_{FE}), que se define como $(S_A + S_C) - (S_B + S_D)$, donde $S_A \sim S_D$ son las salidas de tensiones preamplificadas de los fotosensores A ~ D, respectivamente. Para un punto de luz circular ($z = 0$), $S_{FE} = 0$. La Fig. 1(b) muestra la curva en forma de S conocida por la relación de S_{FE} frente a la distancia de desenfoque de la superficie del objeto. Hay una región lineal para la señal S_{FE} frente a z , por lo que la señal S_{FE} en esta región se puede utilizar para medir la altura y el desplazamiento lineal de una superficie del objeto a lo largo del eje óptico (eje Z). Varios estudios anteriores, demostraron que con la altura de la señal S_{FE} se puede medir el desplazamiento vertical a lo largo del eje Z hasta una resolución de varios nm [16-18].

Este sistema de detección astigmático se basa en la modificación de un cabezal óptico de DVD comercial. Se puede alcanzar una resolución mejor que 0.3 nm en la detección del desplazamiento vertical y lo más importante, puede detectar la inclinación angular de dos dimensiones de la superficie del objeto. Este sistema es capaz de detectar pequeñas resonancias mecánicas debido a movimientos térmicos del cantiléver microfabricado. Dado que las mediciones de desplazamiento lineal y cambios angulares son esenciales en una variedad de tecnologías, este esquema de detección puede prometer muchas otras aplicaciones, como nano-posicionamiento [19], acelerómetros [20], la alineación de objetos pequeños, profilometría de 3D [21] para el perfil de superficies de inspección, etc.

Una ventaja importante para el uso del cabezal óptico de DVD es que se puede operar en un amplio rango de frecuencias. Los cabezales ópticos comerciales de DVD típicos pueden detectar señales a una velocidad de más de 60 MHz y algunos sistemas pueden incluso llegar más allá de 260 MHz [22]. El funcionamiento a altas frecuencias es muy deseable, ya que puede aumentar la velocidad de respuesta del AFM. También puede ser útil para otras aplicaciones, como la detección de ondas acústicas de superficie. [23,24] Otra ventaja es el tamaño del punto enfocado del cabezal óptico de DVD es sólo $0.64 \mu\text{m}$. Así, el haz de láser se puede enfocar fácilmente en cualquier lugar deseado de elementos de tamaño micrométrico para llevar a cabo mediciones dinámicas. Además, los cabezales ópticos de DVD son pequeños, compactos, fiables y de muy bajo costo. Para la aplicación en AFMs, el cabezal óptico de DVD comercial pesa ± 20 g o menos y cuestan más de US \$ 30. El peso de todo el cabezal óptico de DVD y el cantiléver es tan pequeño que pueden ser accionados directamente por un piezo-escáner. Esto simplificaría enormemente el diseño del sistema de AFMs. En comparación, el módulo típico de deflexión de haz pesa varios cientos de gramos y cuesta más de US \$ 10 000. Estos cabezales de deflexión utilizados en AFMs comerciales son generalmente voluminosos, por lo que el módulo y el cantiléver son estacionarios. El éxito de nuestro sistema de detección astigmático sugiere otros esquemas de detección adoptados en tecnologías de discos ópticos, también puede proporcionar una alta sensibilidad en la detección del desplazamiento

vertical y cambios en el ángulo de inclinación a una posición local sobre la superficie de un objeto.

2.2. Escáner-zumbador

El zumbador piezoeléctrico [25] utiliza transductores que convierten las señales eléctricas a ondas sonoras, y se aplica en los relojes y otros numerosos dispositivos de electrónica. Comercialmente se puede encontrar zumbadores piezoeléctricos de disco disponibles que tengan una baja capacitancia y pueden ser controlados por fuentes de bajo voltaje, tales como las salidas analógicas de una tarjeta de adquisición de datos, sin tensión adicional o amplificadores de corriente. Varios rangos de exploración pueden realizarse mediante el cambio de las dimensiones de la estructura de accionamiento y/o la elección de los zumbadores de disco. El zumbador de disco se compone de una capa piezoeléctrica delgada y un diafragma de latón, como se muestra en la Fig. 2(a). El diafragma está conectado a tierra y la capa piezoeléctrica se expande o contrae en respuesta a la tensión aplicada, deformando el zumbador de disco en una forma cóncava hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la polaridad de la tensión, como se muestra en las Figs. 2(b) y 2(c). El escáner-zumbador consta de cinco zumbadores piezoeléctricos de disco, como se muestra en la Fig. 3(a) [7]. Dos pares de zumbadores (X , $-X$) y (Y , $-Y$) son fijos en dos lados de la placa base del escáner en direcciones perpendiculares y el zumbador final

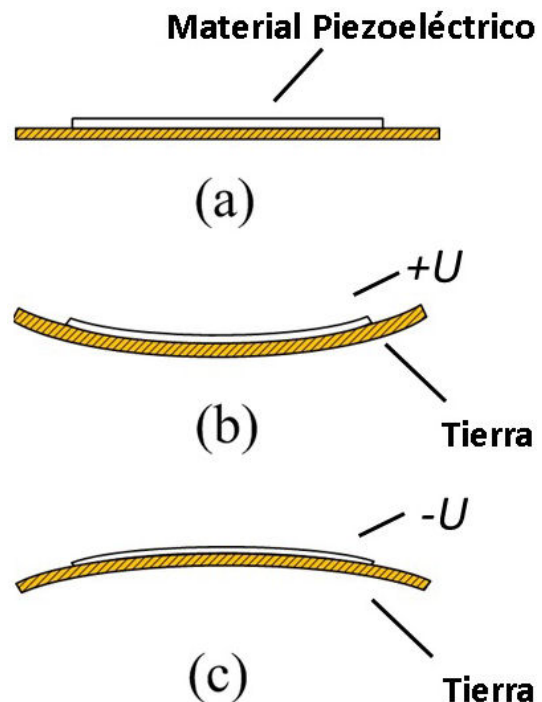


FIGURA 2. Principio de funcionamiento de un disco zumbador piezoeléctrico. (a) Posición neutral. (b) El diafragma de latón está conectado a tierra. Un voltaje positivo fue aplicado a la capa piezoeléctrica provocando una deformación cóncava hacia arriba del disco zumbador. (c) un voltaje negativo induce una deformación cóncava hacia abajo.

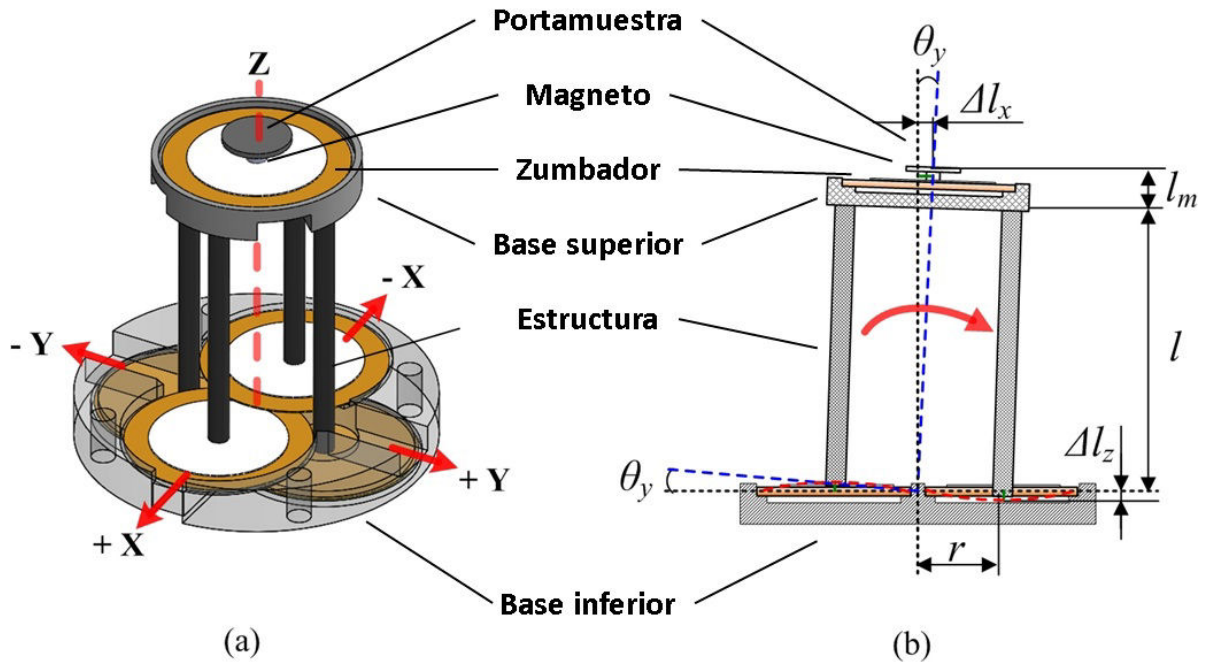


FIGURA 3. (a) Disposición esquemática del escáner-zumbador. (b) Parámetros dimensionales y dinámicos del escáner-zumbador.

se fija en la placa superior del escáner para el accionamiento del eje Z. La placa base y la placa superior están hechas de aluminio. Un soporte de muestra está unido a través de un imán pegado al centro del zumbador del eje Z. Una estructura de medición de cuatro-barras se compone de cuatro elementos de fibra de carbono pegados a la placa superior del escáner en un extremo y en el centro de cada uno de los cuatro zumbadores de disco en el otro extremo. La Fig. 3(b) muestra la deformación de un par de zumbadores ($X, -X$) cuando se aplican voltaje de polaridad opuesta, lo que resulta en el desplazamiento lateral $\pm \Delta l_x$ del soporte de la muestra a lo largo del eje X. Las deformaciones lineales verticales $\pm \Delta l_z$ de los dos zumbadores de disco dirigen a una inclinación angular θ_y del escáner. Como resultado, el soporte de la muestra se desplaza lateralmente en la dirección X de su posición original. El mismo principio de funcionamiento se aplica para el desplazamiento en la dirección Y. El zumbador del eje Z mueve el soporte de la muestra hacia arriba o hacia abajo durante el accionamiento, como se ilustra en las Figs. 2(b) y 2(c).

La Fig. 3(b) muestra los parámetros relacionados con la estructura de accionamiento y el desplazamiento en los dos zumbadores de disco cuando se aplican voltajes de polaridades opuestas. La deformación vertical del zumbador Δl_z puede guiar a una inclinación angular θ_y del escáner, la cual proporciona un desplazamiento lateral Δl_x del soporte de la muestra. Podemos derivar la siguiente relación:

$$\Delta l_x = (l - l_m) \sin \theta_y \cong \frac{l + l_m}{r} \cdot \Delta l_z \quad (1)$$

Donde l es la longitud de la barra y l_m es la altura del soporte de la muestra. De acuerdo con esta ecuación, el rango de exploración lateral se puede aumentar si se utilizan barras más largas. Otra manera de aumentar el rango de exploración lateral es reducir la separación de los zumbadores de disco (r) pero este método está limitado por el diámetro de los zumbadores de disco. El uso de zumbadores de disco más grandes puede resultar en una deformación Δl_z grande, pero la separación de los dos zumbadores de disco (r) también necesita ser aumentada, lo que casi neutraliza el beneficio de grandes zumbadores de disco en el rango de exploración lateral. Un zumbador más grande proporciona movimientos más grandes en el eje Z, pero el ancho de la banda de trabajo se reduce. El escáner-zumbador se haya construido en forma modular y puede ser fabricado y montado fácilmente. Las características de los zumbadores de disco comerciales del mismo modelo son casi idénticas y ninguna modificación física en los zumbadores está involucrada en este diseño.

El rango total de escaneado dependerá de la configuración entre la longitud de las barras y el tipo de escáner-zumbador que se utilice. Se ha deducido que las estructuras más estables permite un alcance de detección de 15 por 15 micrómetros, que pueden ser considerados como el límite superior práctico del rango de escaneo. Aunque una barra más larga puede ampliar el rango de barrido XY, la rigidez del escáner se degrada dramáticamente. Sin embargo, se puede enfocar para explorar áreas más pequeñas, obteniendo una mayor resolución dentro de esta área. Este rango de acción es suficiente para la mayoría de aplicaciones AFM. La rigidez de la escáner-zumbador se puede aumentar adicionalmente utilizando dos zumbadores para cada elemento del accionamiento. Las ventajas de utilizar el disco escáner-zumbador incluyen compac-

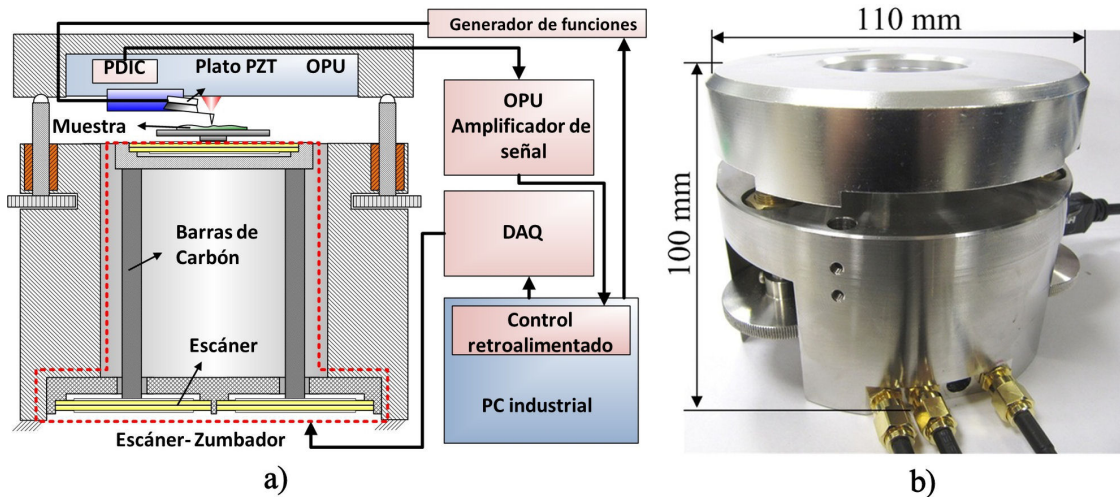


FIGURA 4. (a) Esquemático del OPU-AFM con el escáner-zumbador. (b) Fotografía y dimensiones de la parte optomecánica del AFM.

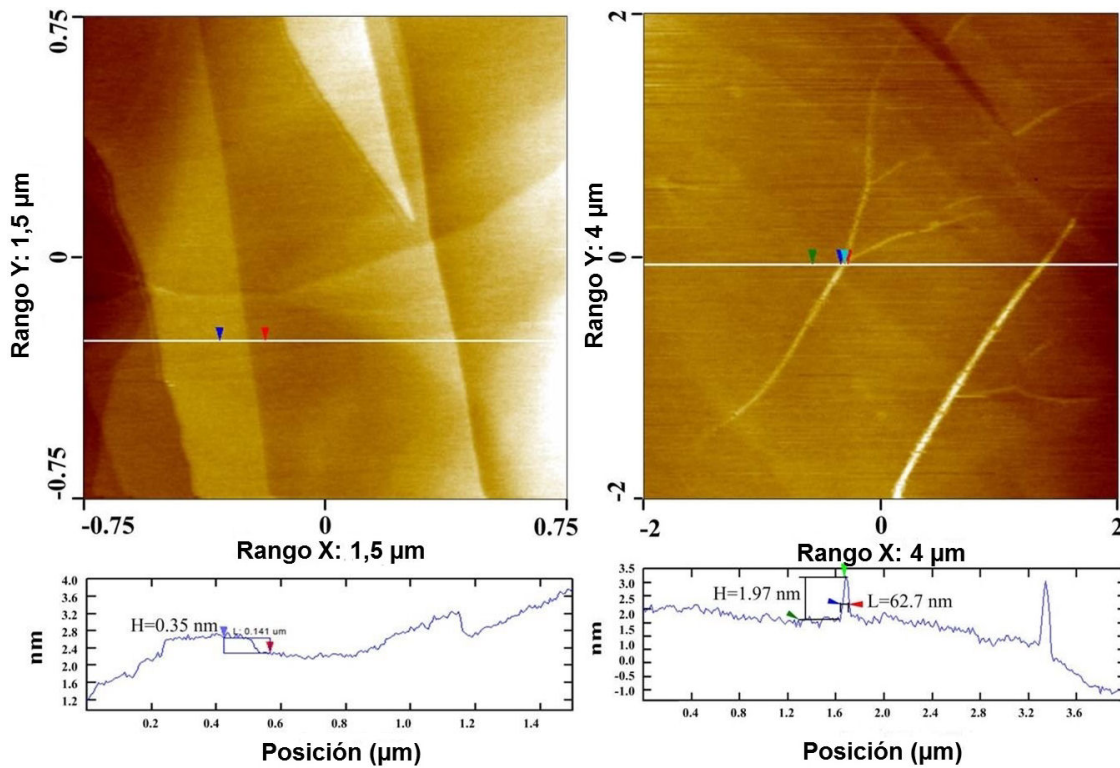


FIGURA 5. Imágenes topográficas de superficie tomadas por el OPU-AFM con el escáner-zumbador. (a) Superficie de HOPG. El alcance de barrido es $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$. Rango de Z; 2.2 nm. (b) Superficie de nanotubos de carbono de doble pared sobre HOPG. El tamaño de escaneo es $4 \times 4 \mu\text{m}$. Rango de Z; 7.8 nm.

tividad, beneficios económicos y un diseño simple. Además, el escáner de disco puede ser operado por señales de bajo voltaje entre -10 a +10 V.

Otra ventaja es que el escáner se puede controlar directamente con una fuente de bajo voltaje y baja corriente, tales como salidas analógicas de una tarjeta de adquisición de datos, abreviada DAQ (del inglés Data Acquisition). Con $\pm 10 \text{ V}$ se pueden obtener señales de accionamiento desde una tarjeta DAQ, el escáner-zumbador puede proporcionar el

movimiento de $5\text{-}100 \mu\text{m}$ en las direcciones XY , y de $0.5\text{-}10 \mu\text{m}$ en la dirección Z , dependiendo de las dimensiones de la estructura de accionamiento y del tipo de zumbador de disco.

La rigidez mecánica del escáner influye en su frecuencia de resonancia, que también determina el desempeño dinámico de muestreo. Las frecuencias de resonancia en los ejes X , Y , y Z de un escáner-zumbador y un escáner tubo [26]. (EBL #1, EBL Products, Inc.) se midieron por un sistema de detec-

ción astigmático (ADS) [27]. Los escáners de cada eje son controlados por una onda sinusoidal de varias frecuencias. Las frecuencias del primer modo de resonancia fueron similares en los dos escáners en los ejes X e Y . Sin embargo, la diferencia de frecuencia de resonancia del escáner-zumbador entre los ejes X e Y fue sólo 11 Hz (aproximadamente 3 %) y la del escáner de tubo era de 58 Hz (aproximadamente 17 %). Esto indica una simetría más favorable para el zumbador-scanner que para el escáner de tubo. Se puede atribuir a la calidad uniforme de los zumbadores de disco comerciales, todos los zumbadores tienen características casi idénticas. Las relativas grandes diferencias entre los escáners de tubo pueden ser inducidas por la estructura no homogénea y/o desviación de material piezoeléctrico.

2.3. El OPU-AFM

Hemos construido un OPU-AFM que utiliza el escáner-zumbador y el sistema de detección astigmático basado en el OPU y evaluamos sus características de trabajo. Un esquemático del OPU-AFM se presenta en la Fig. 4(a). El escáner-zumbador se fija en la parte inferior del AFM y tiene el diseño mostrado en la Fig. 3(a) con barras de fibra de carbono de 3 mm de diámetro. La placa superior tiene cuatro orificios (3 mm de diámetro con una tolerancia de 0.01 mm) para fijar y guiar las barras de fibra de carbono. Utilizamos las salidas analógicas de una DAQ (USB-6351, National Instrument Co., corriente máxima de 5 mA) para accionar el escáner-zumbador directamente. Este OPU-AFM es pequeño y compacto, como se muestra en la Fig. 4(b). La baja capacitancia de los discos zumbadores o una fuente de baja corriente de una tarjeta DAQ típica pueden manejar el escáner-zumbador hasta 2.25 kHz en el eje Z . La velocidad de exploración de los ejes X y Y está limitada por la resonancia mecánica.

La velocidad de escaneo depende del controlador. Con lo cual se afectará directamente al tiempo que tome en analizar una muestra. Se ha demostrado que el sistema puede funcionar con controladores comerciales, [6] alcanzando las altas velocidades especificadas en estos sistemas. El OPU-AFM también se puede operar con controladores económicos como una DAQ. Estos modelos básicos sin embargo ofrecen un rango más limitado de velocidad. Sin embargo, el zumbador-scanner todavía puede ser accionado a una relativa alta velocidad de exploración.

2.4. Imágenes obtenidas por el OPU-AFM

Para verificar el desempeño del OPU-AFM se ha tomado imágenes de muestras de grafito y nanotubos de carbón. La Fig. 5(a) muestra que las capas atómicas individuales en la superficie de grafito pirolítico altamente orientado, abreviada HOPG (del inglés Highly Ordered Pyrolytic Graphite) pueden ser claramente distinguidos por el OPU-AFM utilizando el escáner-zumbador. La resolución en el eje Z está por debajo de 1 nm. El alcance de detección y la velocidad de barrido son de $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$ y 0.8 Hz, respectivamente. La Fig. 5(b)

muestra una imagen topográfica de nanotubos de carbono de doble pared sobre una superficie HOPG medida en el aire con el OPU-AFM. Los nanotubos de carbono pueden ser observados. La altura del nanotubo de carbono medido en la Fig. 5(b) es de aproximadamente 1.97 nm. La anchura a media altura, abreviada FWHM (del inglés Full Width at Half Maximum) del nanotubo es de aproximadamente 62.7 nm. Notamos que la resolución lateral de la imagen puede verse limitada por la forma de la punta, más que por la resolución de posicionamiento del escáner. Además, los nanotubos de carbono tienden a agregarse en paquetes debido a las interacciones de Van der Waals. Así, la anchura de los nanotubos de carbono es significativamente mayor que la de los nanotubos de carbono individuales. Sin embargo, las imágenes demuestran que la estabilidad de las mediciones y la resolución espacial en la dirección vertical son comparables con AFMs comerciales, la mayoría de los cuales utilizan un módulo de detección de deflexión de haz y un escáner de tubo.

3. Conclusiones

Con el tiempo, los cabezales ópticos de las unidades de disco compacto (CD o DVD) se han utilizado para detectar el desplazamiento vertical con una resolución nanométrica y subnanométrica. El mecanismo astigmático adoptado en la mayoría cabezales ópticos también puede detectar inclinaciones angulares 2D respecto a la dirección vertical. Esto permite el acceso a movimientos tridimensionales de elementos micro-mecanizados en cualquier posición deseada.

Aquí hemos presentado un sistema de detección astigmático (ADS) que se puede utilizar para caracterizar las respuestas mecánicas estáticas y dinámicas del AFM con una alta sensibilidad y una amplia detección de rangos de frecuencia. Esto también posee varias características interesantes, tales como la alta sensibilidad, las mediciones dinámicas en un amplio rango de frecuencias y un pequeño tamaño de punto de detección. Con una mayor optimización de los componentes ópticos en el sistema de detección astigmático, este sistema puede abrir nuevas aplicaciones en muchos campos tecnológicos. La detección astigmática también posee varias características notables. Estos son útiles para otros sistemas científicos y de ingeniería, tales como los sistemas de nanoposicionamiento, acelerómetros, nivelamiento de superficies, profilómetros de 3D, etc.

También se ha presentado un novedoso diseño para un escáner-zumbador. Zumbadores de disco comerciales cuestan menos que los escáners de tubo. Además, no se necesitan amplificadores de corriente o voltaje. Comercialmente los zumbadores de disco disponibles son relativamente económicos, con calidad uniforme, alta estabilidad y tienen una ortogonalidad favorable. El escáner-zumbador se puede accionar con voltajes bajos como los de las tarjetas de adquisición de datos típicas para lograr significativos alcances de barrido.

Por lo tanto, el costo de construir un AFM puede reducirse significativamente juntando las dos técnicas mencionadas en el escrito. El valor del OPU-AFM completo con su

controlador se estima en unos pocos miles de dólares, con lo cual puede llegar hasta 1 % o 2 % del valor de un equipo comercial. Se construyó un AFM económico de alto rendimiento, utilizando el escáner-zumbador para mover la muestra y un OPU para detectar la resonancia mecánica de un cantiléver microfabricado. El escáner se compone de una estructura de accionamiento de cuatro-barras y varios zumbadores piezoeléctricos de disco. Para concluir, el OPU-AFM no requiere materiales costosos, la estructura es pequeña, simple y no se requiere complicados procesos de mecanizado. Este diseño OPU-AFM puede proporcionar una solución simple y económica para una alta calidad de imágenes a escala nanométrica de numerosos materiales. El diseño contribuye a la meta de hacer un AFM asequible para cualquier laboratorio, [3] lo que puede estimular la creatividad y el descubrimiento en aplicaciones e investigación, así como en la educación y la formación en la nanociencia y la nanotecnología.

Agradecimientos

Queremos agradecer al Strømlingo DIY AFM de Strømlinet Nano por su apoyo y al taller del Instituto de Física de la Academia Sínica por la construcción de las partes mecánicas. También queremos agradecer Topray Technologies Co. Ltd. por proveer las unidades de lectura ópticas de DVD y a Budgetsensors por proveer sondas de prueba de tipo contact-G. El presente trabajo fue patrocinado por el National Science Council de Taiwan (MOST 103-2627-M-001-011) de la Academia Sínica y el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador .

1. R. Wiesendanger, *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications* (Cambridge: Cambridge University Press, 1994).
2. G. Binnig, C.F. Quate, and C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* **56** (1986) 930.
3. P. West, *Mater. Today* **7** (2004) 64.
4. E.T. Hwu, K.Y. Huang, S.K. Hung and I.S. Hwang, *J. Appl. Phys.* **145** (2006) 2368.
5. E.T. Hwu, S.K. Hung, C.W. Yang, I.S. Hwang and K.Y. Huang, *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 221908.
6. E.T. Hwu, S.K. Hung, C.W. Yang, K.Y. Huang and I.S. Hwang, *Nanotechnology* **19** (2008) 115501.
7. W.M. Wang, K.Y. Huang, H.F. Huang, I.S. Hwang and E.T. Hwu, *Nanotechnology*, **24** (2013) 455503.
8. G. Binnig and D.P.E. Smith, *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 1688.
9. K. Compagnon and P. Kramer, *Phillips Tech. Rev.* **33** (1973) 178.
10. G. Bouwhuis and J.J.M. Braat, *Appl. Opt.* **17** (1978) 1993.
11. D.K. Cohen, W.H. Gee, M. Ludeke and J. Lewkowicz, *Appl. Opt.* **23** (1984) 565.
12. A.J. den Boef, *Appl. Phys. Lett.* **55** (1989) 439.
13. B.H. Hoogenboom, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 074101.
14. T. Göddenhenrich, H. Lemke, U. Hartmann and C. Heiden, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** (1990) 383.
15. G. Meyer, N.M. Amer, *Appl. Phys. Lett.* **53** (1988) 1045.
16. J. Zhang and L. Cai, *IEEE. Instrumentation and Measurement Technology Conf.* (Belgium, 1996) p. 513.
17. K.C. Fan, C.Y. Lin and L.H. Shyu, *Meas. Sci. Technol.* **11** (2000) N1.
18. F. Quercioli, B. Tiribilli, C. Ascoli, P. Baschieri and C. Frediani, *Rev. Sci. Instrum.* **70** (1999) 3620.
19. E.T. Hwu, K.Y. Huang, and I.S. Hwang, *Proc. Optics East, USA* **5602** (2004) 218.
20. E.B. Cooper *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 3316.
21. A. Taguchi, T. Miyoshi, Y. Takaya and S. Takahashi, *Precis. Eng.* **28** (2004) 152.
22. J. Sturm *et al.*, *IEEE J. Solid-State Circuits* **40** (2005) 1406.
23. C. Deger *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **72** (1998) 2400.
24. J.V. Knuutila, P.T. Tikka and M.M. Salomaa, *Opt. Lett.* **25** (2000) 613.
25. J.D. Alexander, M. Tortonesi and T. Nguyen, *US Patent Specification* **5** (1999) 657.
26. G. Binnig and D.P.E. Smith, *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 1688.
27. E.T. Hwu *et al.*, *J. Sensors* **2012** (2012) 580939.