

CAPÍTULO 3

EL ANALIZADOR DINÁMICO DE MICROSISTEMAS ELECTROMECAÑICOS MSA-400

En la actualidad, los dispositivos MEMS reflejan la tendencia tecnológica hacia la miniaturización y la integración multifuncional de los sistemas, lo que nos lleva a la implementación de nuevos productos que cubran los requerimientos del nuevo mercado como reducción de materiales, bajo consumo de energía y, por su puesto una tecnología más avanzada que en un futuro no muy lejano alcanzará mayor desempeño.

Los productos MEMS han ganado aceptación en muchas industrias entre las que se pueden mencionar la automotriz, de las comunicaciones, instrumentación, control y aeroespacial. Sin embargo, la realidad muestra que para entrar de lleno al mercado, es necesario completar los estándares y tolerancias de funcionamiento, y así hacer de los nuevos dispositivos MEMS sistemas más eficaces. Por lo anterior, se requiere realizar la caracterización de los microsistemas pero no sólo en sentido estático sino dinámico es decir, cuando están en funcionamiento.

La caracterización de dispositivos MEMS juega un papel muy importante en el desarrollo y evolución de estos productos. Pues se verifica el diseño inicial del dispositivo lo que involucra pruebas de funcionamiento, comparación de resultados reales con las especificaciones requeridas, y finalmente se determinan variaciones durante el proceso de rediseño, en otras palabras se determina el éxito o el fracaso del diseño original.

La plena caracterización de los dispositivos MEMS presenta retos difíciles, debido a que en un entorno en el que las dimensiones se miden en micras y las frecuencias de resonancia mecánica se miden en kilo Hertz, las técnicas y mediciones convencionales de caracterización de sistemas no pueden ser empleadas.

Estudios anteriores han demostrado que la interferometría con sus diferentes configuraciones, es un método efectivo para realizar la caracterización dinámica de las superficies de los dispositivos MEMS en tercera dimensión para frecuencias de hasta 1 MHz.

La tecnología que se revisa en este trabajo resuelve muchos de los problemas que se presentan durante la caracterización de dispositivos MEMS, pues no se hace uso de técnicas mecánicas, sino ópticas.

3.1 El analizador de Microsistemas MSA-400 del Centro UNAMems

El Analizador de Microsistemas MSA-400 es la principal tecnología de medición para el análisis y visualización de las vibraciones estructurales y la topografía de superficie en micro estructuras como los dispositivos MEMS. Esto, gracias a la completa integración de un microscopio, un vibrómetro de escaneo con láser Doppler, un microscopio con video estroboscópico; y un interferómetro de luz blanca [1].

El MSA-400 está diseñado con la combinación de varias tecnologías que clarifican la respuesta dinámica micro estructural real así como, la topografía. En la actualidad, incorporado en el diseño y ciclo de pruebas de dispositivos MEMS el MSA-400 ofrece información precisa en tercera dimensión de la respuesta estática y dinámica de los dispositivos MEMS que simplifica la solución de problemas, mejorando y acortando los ciclos de diseño y por consiguiente, reduciendo los costos de producción de dispositivos MEMS.



Figura 3.1. MSA-400 del Centro UNAMems.

3.1.1 Descripción general del analizador MSA-400

El Analizador de Microsistemas MSA-400 hace uso de la luz para realizar mediciones en tercera dimensión tanto estáticas como dinámicas sin necesidad

de hacer contacto con los dispositivos MEMS. Para ello, se emplean tres tecnologías fundamentales: un vibrómetro con Láser Doppler para medir la respuesta dinámica fuera del plano; un microscopio con video estroboscópico para medir la respuesta dinámica en el plano; y un interferómetro de luz blanca para obtener la topografía en tercera dimensión y de alta resolución de los dispositivos MEMS [1]. Estas tres tecnologías ópticas se encuentran totalmente integradas de forma compacta en un robusto y fiable cabezal de medición.

Con la combinación de dos técnicas de medición complementarias para el estudio del comportamiento de vibraciones de las micro estructuras, es posible obtener una respuesta más precisa de los dispositivos MEMS. Por ejemplo, se pueden identificar, visualizar y medir rápidamente las frecuencias de resonancia y las respuestas transitorias de los dispositivos MEMS. Usando la excitación del micro sistema de banda ancha con la técnica de láser Doppler, es posible encontrar rápidamente las frecuencias de resonancia mecánica sobre el plano y fuera del plano sin necesidad de conocer dicha información con anterioridad. Empleando la técnica del microscopio con video estroboscópico se puede obtener información precisa en amplitud y fase de las resonancias sobre el plano identificadas por el láser del vibrómetro.

Los beneficios que ofrece el Analizador de Microsistemas MSA-400 son:

- Identificación y visualización rápida tanto de las frecuencias de resonancia así como de la topografía de los MEMS.
- Integración total de un microscopio óptico con tecnologías que ofrecen la medición dinámica y estática de los dispositivos MEMS.
- Fácil integración con plataformas de estaciones de pruebas para dispositivos MEMS.
- Acorta el ciclo de medición de dispositivos MEMS.

3.2 Caracterización de MEMS

3.2.1 Topografía de los MEMS

Las propiedades de las superficies tales como la rugosidad, son parámetros importantes que nos ayudan a verificar la calidad en el proceso de producción de los dispositivos MEMS.

Conociendo la topografía real de los MEMS es posible comparar las dimensiones reales de las estructuras que conforman al dispositivo con las requeridas en el diseño, lo que requiere de técnicas no táctiles y con resoluciones de micrómetros y, algunas veces nanómetros.

El análisis estático de las estructuras de los MEMS se realiza principalmente para determinar los desplazamientos, las tensiones y deformaciones de éstas causadas al aplicar cargas externas. Con dichos análisis, se determinan los límites de funcionamiento del sistema en general, y con ello se pueden realizar cambios precisos en la geometría de las micro estructuras para lograr el desempeño requerido. Además, con dichas mediciones y con un análisis más avanzado y riguroso se pueden realizar estudios del envejecimiento y resistencia de las estructuras [2].

La topografía de los MEMS resulta de suma importancia para la realización de estudios más avanzados de las estructuras, que van desde la simple medición de dimensiones hasta la plena caracterización de las deformaciones estructurales, resistencia térmica y mecánica de materiales, defectos en la superficie y deficiencias en los diseños geométricos de los dispositivos MEMS.

3.2.2 El Sistema de Medición Topográfica (TMS)

El desempeño dinámico de los dispositivos MEMS está directamente ligado con los parámetros del proceso de producción que determinan la geometría de las micro estructuras. El Sistema de Medición Topográfica integrado en el Analizador de Microsistemas MSA-400, es el encargado de realizar las mediciones topográficas en segunda y tercera dimensión de los MEMS.

Un conjunto de datos con alta resolución espacial y valores precisos de Z de todos los puntos, alimenta una poderosa herramienta de análisis que determina la forma, la curvatura, la planicidad o planitud, y la rugosidad de las micro estructuras. Esto se realiza pasando un objetivo de referencia con resolución nano métrica con respecto a la muestra, generando una cartografía de alta precisión en los ejes tridimensionales X, Y, Z. El usuario puede seleccionar el tipo de procesamiento de datos, entre evaluación de la envolvente, o evaluación de fase [3]; así como, filtros digitales y técnicas de ocultación de datos. Los beneficios obtenidos por el Sistema de Medición Topografía son:

- Una rápida medición topográfica en tercera dimensión de alta resolución sin necesidad de hacer contacto con la superficie.
- Determinación de la altura y forma de las micro estructuras con diferentes tipos superficies.
- Técnica de superposición de capas con diferentes niveles de contraste y materiales.
- Presentación de las estructuras en dos y tres dimensiones.

A continuación, se revisa con más detalle las técnicas empleadas por el Sistema de Medición Topográfica.

3.2.2.1 Teoría de la Interferometría de luz blanca

Las estructuras tridimensionales con superficies lisas ópticamente rugosas con o sin escalones pueden ser medidas con interferómetros de luz blanca de escaneo vertical.

La Interferometría de luz blanca es un método óptico no táctil utilizado para la realización de mediciones de perfiles en tercera dimensión de estructuras con dimensiones de entre unos cuantos centímetros hasta micrómetros. La incertidumbre de la topografía medida con este método no depende de los parámetros del montaje óptico como es el caso de otros métodos de medición como el método de detección por enfoque, y la interferometría de triangulación y corte.

El escáner actúa con la ayuda de una etapa de posicionamiento de alta precisión (coordenada Z o piezo), que modifica ya sea la longitud de la referencia o la longitud del brazo de medición. Una fuente de luz con longitud coherente de micrómetros es usada para obtener la señal de interferencia únicamente para los pixeles en los que la longitud de la referencia y la longitud del brazo de medición son aproximadamente iguales.

La medición se obtiene de cada uno de los pixeles de la cámara independientemente de los pixeles alrededor de estos, y por lo tanto, al correspondiente lugar sobre la superficie del objeto en medición. La altura del objeto es medida con la adquisición de los valores de "Z" de la etapa de posicionamiento, es decir, que se escoge el pixel en el que ocurre la máxima

modulación de la señal de interferencia. Dichas señales son procesadas en una computadora personal.

La técnica puede ser usada para medir estructuras con escalones tan altos como el rango vertical de trayecto de la etapa de posicionamiento. Incluso, superficies rugosas en las que se producen motas pueden ser medidas con este método. Para la interferencia de luz blanca es necesario que la longitud de coherencia de la fuente de luz sea lo suficientemente pequeña para brindar un correlograma claro de envolvente máxima. Usualmente, el correlograma tiene entre 5 y 100 periodos con modulación visible de la señal de interferencia [3].

3.2.2.2 Interferómetro de luz blanca de Michelson

El Interferómetro de luz blanca es similar al Interferómetro de Twyman-Green, es una forma especial del interferómetro de Michelson con óptica de imagen que proyecta el objeto y el plano de referencia en una pantalla de 2 dimensiones. Dicha pantalla es una cámara acoplada por carga (CCD Camera Chip) también se utiliza una fuente de luz de banda ancha para el Interferómetro de luz blanca. El objeto bajo investigación se encuentra en uno de los brazos del interferómetro.

Un objeto con superficie rugosa posee un patrón de intensidad aleatoria que interfiere con la luz del plano de referencia en el detector de plano. Cada una de las diminutas protuberancias o imperfecciones tiene una fase aleatoria. Y dicha fase permanece aproximadamente constante en su correspondiente protuberancia o imperfección. Por lo tanto, una interferencia aparece en la cámara como un pixel, si las longitudes del camino óptico de los dos brazos difieren menos de la mitad de la longitud de onda coherente de la fuente de luz. Cada pixel del sensor de la cámara es una muestra del típico correlograma de luz blanca (señal de interferencia) cuando la longitud de la referencia o la longitud del brazo de medición se modifican en la etapa de posicionamiento. La señal de interferencia de un pixel tiene una modulación máxima cuando la longitud del camino óptico que incide sobre el pixel es exactamente el mismo tanto para la referencia como para el haz objeto.

Por lo tanto, el valor de Z para el punto de la superficie de la imagen en dicho pixel corresponde al valor de Z de la etapa de posicionamiento en el que la modulación del correlograma fue la máxima. Posteriormente, se obtiene una

matriz con los diferentes valores del alto de la superficie del objeto a medir, determinando los valores Z de la etapa de posicionamiento en los que la modulación fue máxima para cada uno de los pixeles de la cámara. Las posiciones sobre el plano de los diferentes valores del alto de dicha superficie, dependen del correspondiente punto en el objetivo que es la imagen en la cámara formada por la matriz de dichos pixeles. Dichas coordenadas laterales, en conjunto con las correspondientes coordenadas verticales, describen la forma geométrica del objeto medido. La incertidumbre de la imagen lateral, depende principalmente de la rugosidad de la superficie medida. Para superficies lisas la exactitud de la medición está limitada por la exactitud de la etapa de posicionamiento.

La configuración óptica de un interferómetro Twyman-Green se muestra en la figura 3.2.

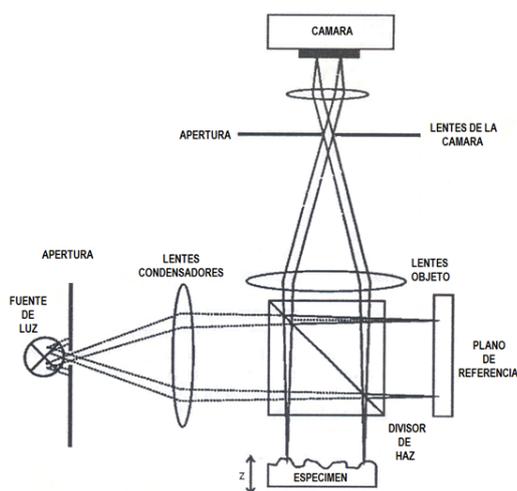


Figura 3.2. Configuración óptica del Interferómetro Twyman-Green con sensor de cámara.

El funcionamiento de un sistema de este tipo es el siguiente: los lentes de un condensador coliman la luz de la fuente de luz de banda ancha. Un divisor de luz divide el haz de luz en haz de referencia y haz de medición. Un haz se refleja en el espejo de referencia, mientras que el otro haz se refleja o dispersa por la superficie del objeto a medir. Los haces de luz que regresan son retransmitidos por el divisor de haz al sensor acoplado por carga (CCD sensor), formando así, una señal de referencia, dependiente de la posición del objeto para cada uno de los pixeles. El ancho del correlograma es la longitud de

coherencia y, por lo tanto, depende de la anchura espectral de la fuente de luz [3].

3.2.2.3 Microscopios con interferómetros de luz blanca

Es necesario combinar el interferómetro con la configuración óptica de un microscopio para poder visualizar estructuras microscópicas. Como el arreglo que se muestra a continuación.

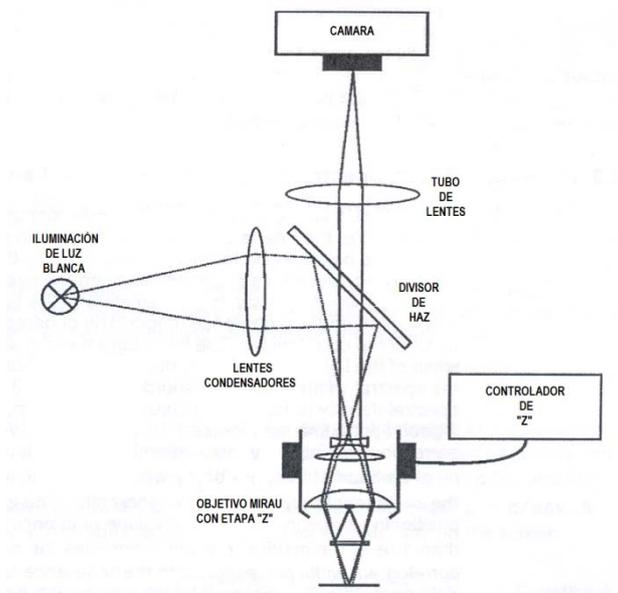


Figura 3.3. Diseño esquemático de un microscopio de interferencia con objetivo Mirau.

La configuración es similar al del microscopio óptico común. Las únicas diferencias son los objetivos de interferometría óptica, y una etapa de posicionamiento de alta precisión (un actuador piezoeléctrico), que se utiliza para mover el objetivo interferométrico verticalmente.

La magnificación óptica de la imagen en el chip acoplado por carga (CCD chip), no depende de la distancia entre el tubo de la lente y la lente objetivo, siempre que el microscopio proyecte el objeto bajo investigación al infinito. El objetivo interferométrico es la parte más importante de un microscopio interferométrico. Existen dos tipos de objetivos diferentes: el objetivo de Michelson y el objetivo de Mirau.

En el caso del objetivo de Michelson, un divisor de haz entre las lentes objetivo y el objeto bajo investigación desvía el haz de referencia de forma oblicua en un espejo de referencia. El divisor de haz se encuentra, por lo tanto, en un ángulo de 45° con respecto al eje óptico de las lentes objetivo. Esto significa

que, este tipo de objetivo requiere de un sistema de lentes con gran distancia de alejamiento. Así que, los objetivos con más de 5x, no están diseñados usualmente como objetivos Michelson, pero sí como, objetivos Mirau.

En el objetivo Mirau como el mostrado en la figura anterior, el haz de referencia es reflejado en la dirección del objetivo frontal por un divisor de haz. En el objetivo frontal se encuentra una réplica miniatura del mismo tamaño que la superficie de iluminación sobre el objeto bajo investigación. Por lo que para altas magnificaciones el espejo resulta tan pequeño que su efecto de sombreado puede ser ignorado. Moviendo el objetivo interferométrico se modifica la longitud del brazo de medición. La señal de interferencia de un pixel tiene una máxima modulación cuando la longitud del camino óptico de la luz que incide en el pixel es exactamente el mismo tanto para la referencia como para el haz objeto. Así que, los valores de Z para el punto sobre la superficie imagen de ese pixel, corresponde al valor Z de la etapa de posicionamiento en el que la modulación del correlograma es máxima.

3.2.2.4 Relación entre ancho espectral y longitud coherente

Como mencionamos con anterioridad, los valores Z de la etapa de posicionamiento cuando la modulación de la señal de interferencia para cierto pixel es máxima y definen el valor de la altura para ese pixel. Por consiguiente, la calidad y forma del correlograma tiene mayor influencia en la resolución y exactitud del sistema.

Los parámetros más importantes de la fuente de luz son su longitud de onda y su longitud de coherencia. La longitud de coherencia define el ancho del correlograma. Así que, el correlograma está una vez más relacionado con el ancho espectral de la fuente de luz. Por lo tanto, el ancho del correlograma depende del ancho espectral de la fuente de luz. En la figura 3.4 se puede observar la función de densidad espectral de la función de Gauss que es una buena aproximación al comportamiento de un LED.

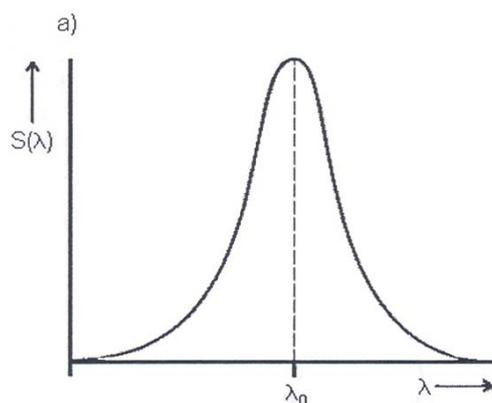


Figura 3.4. Función de densidad espectral de la fuente de luz.

En la figura 3.5 se observa que la intensidad de la modulación correspondiente es substancial sólo en la vecindad de la posición Z_0 en donde la referencia y el haz objeto tienen la misma longitud coherentemente superpuestos.

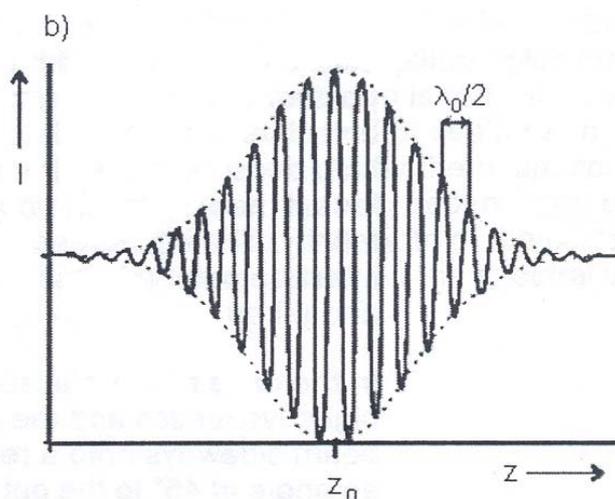


Figura 3.5. Intensidad de luz como función de la posición del espejo objeto.

El rango de Z en la etapa de posicionamiento en el que la envolvente de la intensidad de la modulación es más alta que $1/e$ del valor máximo determina el ancho del correlograma. El ancho del correlograma corresponde a la longitud de coherencia, porque la diferencia entre la longitud del camino óptico es dos veces la longitud de la diferencia entre la longitud de la referencia y la longitud del brazo de medición del interferómetro [3].

La relación entre el ancho del correlograma, la longitud de coherencia y el ancho espectral se calcula con función espectral de Gauss. La función de densidad espectral normalizada es

$$S(v) = \frac{1}{\Delta v \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{v-v_0}{\Delta v} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Donde $2\Delta v$ es efectiva para anchos de banda $1/e$, y v_0 es la frecuencia media. De acuerdo, a la generalización del teorema de Wiener-Khintchine [4], la función de autocorrelación del campo de luz está dada por la transformada de Fourier de la densidad espectral.

$$k(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(v) \exp(-i2\pi v\tau) dv = \exp(-\pi^2 \tau^2 \Delta v^2) \exp(-i2\pi v_0 \tau) \quad (3.2)$$

La cual, se mide por la interferencia de la luz sobre el terreno de referencia y el haz objeto. En relación con el caso en el que las intensidades en ambos brazos del interferómetro son las mismas, la intensidad observada en la pantalla resulta en:

$$I(Z) = I_0 \text{Re}\{1 + k(\tau)\} \quad (3.3)$$

En donde,

$$I_0 = I_{obj} + I_{ref} \quad (3.4)$$

Además, I_{obj} y I_{ref} son las intensidades en el sensor del objeto y el brazo de referencia, respectivamente. La frecuencia promedio puede ser expresada como el promedio de la longitud de onda central, como:

$$v_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (3.5)$$

Y el ancho de banda efectiva como el promedio de la longitud de coherencia,

$$I_c = \frac{c}{\pi \Delta v} \quad (3.6)$$

Lo que nos lleva a la siguiente ecuación que será la ecuación principal para nuestras evaluaciones y cálculos,

$$I(Z) = I_0 \left(1 + \exp \left[-4 \left(\frac{Z-Z_0}{I_c} \right)^2 \right] \cos \left(4\pi \frac{Z-Z_0}{\lambda_0} - \varphi_0 \right) \right) \quad (3.7)$$

Tomando en cuenta que,

$$\tau = 2 \cdot \left(\frac{Z-Z_0}{c} \right) \quad (3.8)$$

Donde c es la velocidad de la luz, dicha ecuación describe el correlograma que se muestra en la figura 3.6, en la que se puede observar la distribución de la intensidad que se forma con la envolvente de Gauss con un periodo de modulación de $\lambda_0/2$.

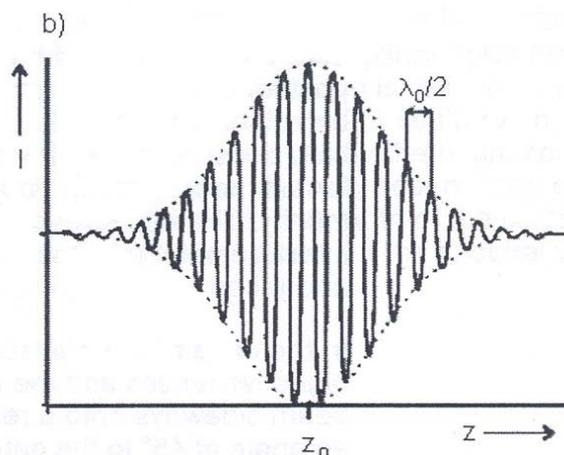


Figura 3.6. Intensidad de luz como función de la posición del espejo objeto.

En realidad, cada pixel de la cámara muestrea el correlograma con un periodo de muestreo dependiente de la velocidad de la cámara y de la velocidad de la etapa de posicionamiento. Además, los cambios de fase en el reflejo de la superficie objeto, las imprecisiones en la etapa de posicionamiento, la diferencia de separación entre los brazos del interferómetro real, los reflejos de otras superficies diferentes a la superficie objeto, y el ruido que existe en el sensor de la cámara; conducen a la construcción de un correlograma deforme. Por lo que, el correlograma real puede diferir del correlograma que resulta de la ecuación a la que se llegó anteriormente. Sin embargo, deja claro que, existe una fuerte dependencia entre el correlograma y dos parámetros de la fuente de luz que son la longitud de onda y la longitud de coherencia.

3.2.2.5 Cálculo de la “envolvente máxima”

La envolvente está descrita por el término exponencial de la ecuación (3.7) que es,

$$E(Z) = \exp \left[-4 \left(\frac{Z-Z_0}{l_c} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

El software del Analizador de Microsistemas MS-400 calcula la envolvente a partir de los datos del correlograma. El principio del cálculo de la envolvente es el remover el término del coseno de la ecuación (3.7). Con la ayuda de la transformación de Hilbert el término coseno se cambia por el término seno. La

envolvente se obtiene de la suma de las potencias del coseno y del seno de los correlogramas modulados.

$$E(Z) = \sqrt{\left(\exp\left[-4\left(\frac{Z-Z_0}{I_c}\right)^2\right] \cos\left(4\pi\frac{Z-Z_0}{\lambda_0}\right)\right)^2 + \left(\exp\left[-4\left(\frac{Z-Z_0}{I_c}\right)^2\right] \sin\left(4\pi\frac{Z-Z_0}{\lambda_0}\right)\right)^2} \quad (3.10)$$

Para el cálculo de la “envolvente máxima” se implementaron dos ligeramente algoritmos diferentes. El primer algoritmo hace uso de la evaluación de la envolvente, en el que el valor de Z se deriva de la envolvente máxima.

El segundo algoritmo, se usa como primer paso de la evaluación del “método de fase”. Se puede utilizar cualquiera de los algoritmos propuestos, gracias a la interface de automatización.

La incertidumbre del cálculo de la “envolvente máxima” depende principalmente de:

- La longitud de coherencia
- El periodo de muestreo del correlograma
- Desviaciones en los valores Z debido principalmente a vibraciones
- El contraste
- La rugosidad de la superficie

Por lo que, para mejores resultados se sugiere, una longitud de coherencia pequeña, periodo de muestreo pequeño, una muy buena aislación de vibraciones, un alto contraste y superficies preferentemente lisas.

3.2.2.6 Método de la evaluación de Fase

Debido al inevitable ruido en el correlograma de medición, existe una incertidumbre considerable en el cálculo de la “envolvente máxima”. Dicha incertidumbre, puede ser considerablemente reducida evaluando la fase φ_0 de la ecuación (3.7), después de haber calculado la “envolvente máxima”. Sin embargo, la evaluación de dicha fase tiene ciertas restricciones:

- La superficie debe ser ópticamente lisa
- La superficie debe estar compuesta por un único material preferentemente, pues materiales diferentes generan cambios de fase

- La incertidumbre de la “envolvente máxima” debe ser menor a $\pm \lambda/4$

Las mediciones que no son adecuadas para la evaluación de fase, muestran ya sea, escalones con una altura de $\lambda/2$, o en el caso de superficies rugosas, el tiempo de procesamiento aumenta considerablemente. Si se presentan escalones con alturas de $\lambda/2$, estos pueden desaparecer disminuyendo el periodo de muestreo [3].

3.3 Caracterización Dinámica de los MEMS dentro del plano

A pesar del crecimiento exponencial en la última década en cuanto a actividades de investigación y desarrollo se refiere, sólo algunos productos MEMS se encuentran comercialmente disponibles. Entre los que se incluyen acelerómetros, pantallas basadas en espejos digitales, micro inyectores de tinta y sensores de presión [3] [4]. La brecha entre la investigación y la comercialización de dichos productos se debe principalmente a la falta de fiabilidad y robustez de los componentes.

Por lo que la necesidad de contar con procedimientos simples y estandarizados que permitan realizar evaluaciones precisas de funcionamiento, confiabilidad y calidad de los dispositivos MEMS se ha incrementado cada vez más.

El completo desarrollo, proceso de optimización y control de calidad de los dispositivos MEMS requieren no sólo de la caracterización de su topografía y forma, sino también del análisis dinámico de alta resolución.

Las mediciones estáticas de los MEMS proporcionan información sobre los efectos de los factores geométricos, así mismo la medición de los factores dinámicos permite el estudio de la respuesta en frecuencia del sistema, la deformación, los rangos de funcionamiento y factores de calidad entre otras cosas del sistema completo durante su desempeño dinámico.

De ahí que, el completo desarrollo de los dispositivos MEMS se centra fundamentalmente en el diseño general y en los parámetros de optimización del elemento principal con respecto a los parámetros de la eficiencia deseada, por ejemplo, el desplazamiento, la fuerza, las limitaciones dimensionales, principio de actuación entre otras.

En este trabajo se revisarán dos técnicas ópticas utilizadas por el MSA-400 para la caracterización dinámica de dispositivos MEMS cuyo desempeño se realiza sobre el plano y fuera del plano.

3.3.1 El Analizador de Movimiento dentro del Plano (PMA)

Para hacer posible la medición del movimiento en el plano de los dispositivos MEMS se aplica una técnica de iluminación con un estroboscopio. Con la utilización de la iluminación con luz estroboscópica y una cámara digital, los movimientos de alta velocidad hechos por los objetos se pueden congelar en el tiempo para capturar la posición exacta de dichos objetos.

El proceso del Analizador de movimiento en el plano garantiza un alto grado de precisión, y una modalidad de observación para el análisis en tiempo real tiempo.

El sistema está configurado para operar en bandas de frecuencias predefinidas ya seleccionadas para mediciones de vibraciones del dispositivo MEMS fuera del plano.

Una vez configurado, dichas mediciones de banda múltiple son procesadas automáticamente alrededor de las frecuencias de resonancia seleccionadas.

Los beneficios y características que ofrece el Analizador de movimiento sobre el plano son:

- Mediciones de movimiento en el plano con video estroboscópico con frecuencias de hasta 1 MHz
- Mediciones en el dominio del tiempo de desplazamiento con resolución nano métrica
- Generador de señales integrado para realizar mediciones de respuesta de señales de entrada escalón, escalón negativo y senoidal, esta última para generar diagramas de Bode
- Ahorro de tiempo, procesamiento automático de banda múltiple

A continuación se revisará con más detalle las técnicas utilizadas por el Analizador de movimiento sobre el plano.

3.3.1.1 Máquina de visión estroboscópica

El Analizador de Movimiento Planar de Polytec PMA puede medir procesos periódicos con frecuencias de hasta 1 MHz. Para ello se utiliza una cámara a velocidad normal y empleando el principio de la luz estroboscópica es posible visualizar movimientos de alta frecuencia. El tiempo de resolución del sistema se determina con el ancho de pulso del LED de flash estrobo, pues la cámara no posee la velocidad necesaria para capturar eventos tan cortos.

El sensor CCD (Dispositivo Acoplado por Carga) no captura ninguna imagen cuando la luz estroboscópica está apagada. Esto significa que, la luz es registrada sólo durante los instantes del movimiento en los que la luz del flash está encendida, y los eventos pueden ser grabados por un periodo de tiempo aún menor al tiempo de exposición más corto de la cámara.

La señal de excitación del dispositivo MEMS que ocasiona su vibración, el LED de flash estrobo, y la cámara de exposición tienen que estar perfectamente sincronizados. A continuación en la figura 3.7 se muestra el diagrama de tiempo de la sincronización del Analizador de Movimiento sobre el Plano PMA para dos disparos de la cámara tomados en dos fases diferentes del periodo de excitación del dispositivo MEMS.

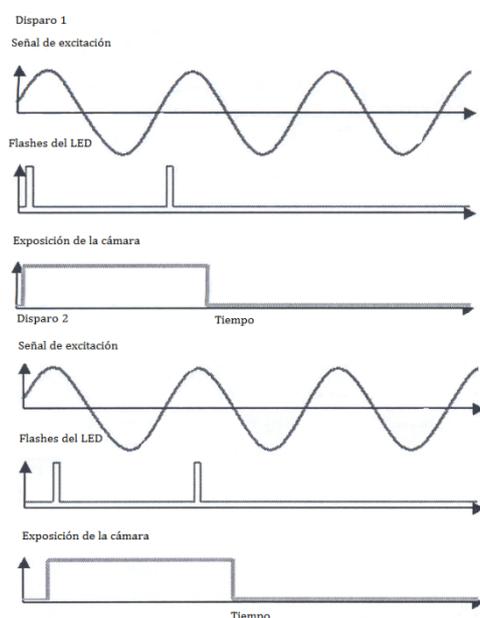


Figura 3.7. Diagrama temporal de la señal de sincronización.

En el ejemplo anterior, dos flashes del LED estrobo son usados dentro del periodo de exposición de la cámara digital. El número de flashes por disparo de

la cámara sólo puede ser incrementado hasta que el producto del número de flashes y el periodo de la señal de excitación (el total de la longitud de la secuencia) alcance el total de tiempo de exposición de la cámara. En el siguiente, una secuencia de flashes dentro del periodo de exposición de la cámara lo consideramos un disparo. El tiempo entre dos disparos es el ciclo de duración de la velocidad de cuadro de la cámara.

La fase de retraso de la iluminación estroboscópica con respecto a la señal de excitación se ajusta mediante el establecimiento de la demora de tiempo entre los disparos, $T_{disparo}$ es un valor dado por:

$$T_{disparo} = n \cdot T_{excitación} + t_{retraso\ fase} \quad (3.11)$$

Donde,

n es un número entero

$T_{excitación}$ es el periodo de oscilación de la señal de excitación

$t_{retraso\ fase}$ es el cambio de tiempo de acuerdo al retraso de fase

La velocidad de cuadro máxima F_c de la cámara digital limita la frecuencia de disparo en $F_c \geq 1/T_{disparo}$. Todo el proceso del diagrama de tiempo se demuestra de forma simple cuando todas las imágenes necesarias para obtener la respuesta de desplazamiento sobre el plano del dispositivo MEMS son capturadas para una señal de excitación [7].

3.3.1.2 Parámetros importantes del sistema

El número de flashes por disparo de cámara no afecta el tiempo de resolución del sistema, pero es necesario para adaptar el brillo de las imágenes cuando se usan pulsos cortos del estrobo. Los pulsos cortos del estrobo son necesarios para poder congelar los movimientos rápidos de las micro estructuras. Una imagen borrosa ocurre cuando la micro estructura se mueve una distancia mayor que la distancia que corresponde al diámetro de un pixel de la cámara (323 nm para una magnificación de 20x) durante la iluminación estroboscópica. Es necesario un número pequeño de flashes por disparo (preferentemente un sólo flash) si es que el objeto no desempeña un movimiento periódico preciso [7].

3.4 Caracterización Dinámica de los MEMS fuera del Plano

Como ya hemos visto el desarrollo de los MEMS requiere de altas resoluciones ópticas tanto para la caracterización estática como para la caracterización dinámica.

En el desarrollo de los MEMS existe una necesidad constante de comparar eficientemente las simulaciones numéricas con los movimientos reales de los dispositivos para así adaptar las características geométricas en el proceso de producción.

Para hacer posible la caracterización dinámica de los MEMS debemos realizar el análisis de la respuesta en frecuencia de las micro estructuras. Una vez que se obtiene la frecuencia de resonancia de las diferentes estructuras como: catilevers, juntas de flexión, micropuentes y membranas, será posible evaluar los efectos de factores geométricos durante el desempeño dinámico de los dispositivos.

Como ya hemos aprendido, para realizar la medición de los movimientos durante el desempeño real de los MEMS no se hace uso de técnicas convencionales sino de técnicas ópticas no invasivas.

Así que, se realizan mediciones ópticas de los movimientos de los microsistemas para caracterizar sus propiedades mecánicas. Dichos métodos brindan mediciones de las vibraciones fuera del plano dependiendo del desempeño de los dispositivos de ciertos puntos sobre la estructura en cuestión.

La tecnología del MSA-400 utilizada para la caracterización dinámica fuera del plano de microsistemas es capaz de detectar las vibraciones que se emiten por el movimiento de los sistemas en las distintas áreas de interés y con ello, a través de etapas de procesos digitales es posible obtener los diagramas de la respuesta en frecuencia de los sistemas así como, la simulación del desempeño de los microsistemas.

En las siguientes secciones de este capítulo se revisa más a detalle las técnicas utilizadas por el Vibrómetro de Micro Escaneo del MSA-400.

3.4.1 El Vibrómetro de Micro escaneo (MSV)

El vibrómetro con láser Doppler de Micro escaneo es el instrumento necesario para el desarrollo de microsistemas resonantes, pues ofrece un traductor óptico

de alta precisión para determinar la velocidad de vibración y desplazamiento en un punto de muestra. El sistema trabaja detectando el cambio súbito de frecuencia del láser en una superficie móvil.

Moviendo el punto de medición en diferentes posiciones predefinidas el escáner de láser Doppler brinda una fotografía completa del comportamiento vibratorio fuera del plano del dispositivo MEMS.

No hay frecuencias discretas en las que las mediciones puedan ser realizadas, sino que los datos de frecuencia por encima del ancho de banda del instrumento están disponibles en milisegundos por cada punto de muestra.

Las características y beneficios del Vibrómetro de Micro escaneo son:

- Mapeo vibratorio de banda ancha e información de la respuesta en frecuencia fuera del plano
- Datos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, simplificando el análisis de la respuesta transitoria
- Redes de muestra de alta densidad de hasta 512X512 puntos de medición definidos por el usuario
- Importación y exportación de datos versátiles para la validación de modelos FE
- Sonda de láser submicrónica para la medición de micro estructuras.
- Láser con potenciómetro para optimizar las condiciones de medición.

En las siguientes secciones se revisarán los principios de operación del Vibrómetro de microescaneo.

3.4.1.1 La vibrometría con Láser Doppler

En general, podemos decir que la vibrometría con láser Doppler es una herramienta ampliamente aceptada para la caracterización dinámica de dispositivos MEMS. Pues es una técnica no táctil que permite la medición de superficies miniatura calientes o suaves.

3.4.1.2 Principios de la vibrometría con láser Doppler

Los vibrómetros láser se basan en el principio de detección del efecto Doppler de la luz láser coherente, que se dispersa en un área pequeña del objeto bajo estudio. Dicho objeto dispersa o refleja la luz del haz láser, y el cambio de

frecuencia Doppler es usado para medir la componente de velocidad que se encuentra a lo largo del eje del haz láser.

Como el láser tiene una frecuencia muy alta (aproximadamente $4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$), una demodulación directa de la luz no es posible. Es por esta razón que se utiliza un interferómetro óptico para mezclar la luz dispersada coherentemente con el haz de referencia. El fotodetector mide la intensidad de la luz mezclada cuyo ritmo de frecuencia es igual a la diferencia de frecuencia entre la referencia y el haz de medición. Este arreglo puede ser un interferómetro de Michelson como el que se muestra en la figura 3.8.

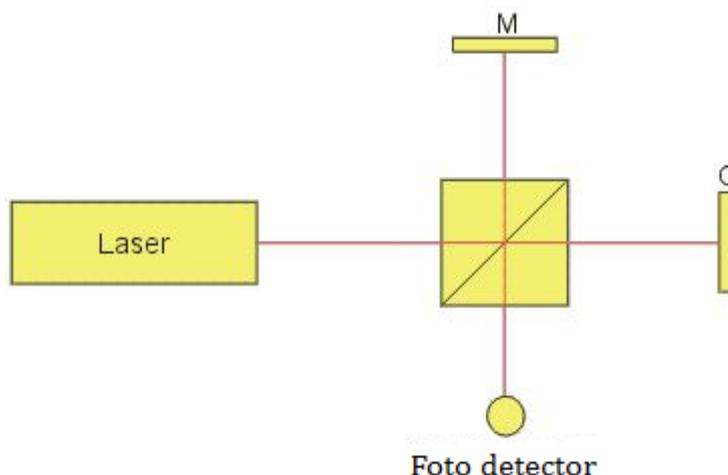


Figura 3. 8. Interferómetro de Michelson.

El haz del láser es dividido por un divisor en un haz de medición y un haz de referencia que se propagan en los brazos del interferómetro. Las distancias que la luz recorre entre el divisor de haz y cada reflector son x_R y x_M , el espejo de referencia es M y el objeto O.

Las fases ópticas correspondientes de los haces en el interferómetro son:

Referencia

$$F_R = 2kx_R \quad (3.12)$$

Medición

$$F_M = 2kx_M \quad (3.13)$$

Donde, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Generalmente se define

$$F(t) = F_R - F_M \quad (3.14)$$

El fotodetector mide la intensidad dependiente del tiempo en el punto donde el haz de la medición y el haz de referencia interfieren.

$$I(t) = I_R I_M R + 2k\sqrt{I_R I_S R} \cos(2\pi f_D t + \Phi) \quad (3.15)$$

Donde I_R y I_M son las intensidades de los haces de referencia y de la medición respectivamente, K es el coeficiente de eficiencia de la mezcla y R es la reflectividad efectiva de la superficie.

$$\text{La fase } F = 2\pi DL/l \quad (3.16)$$

Donde DL es el desplazamiento ocasionado por la vibración del objeto y l es la longitud de onda de la luz del láser.

Si DL cambia continuamente, la intensidad de la luz $I(t)$ varía de forma periódica. Un cambio de fase F de 2π corresponde a un desplazamiento DL de $1/2$.

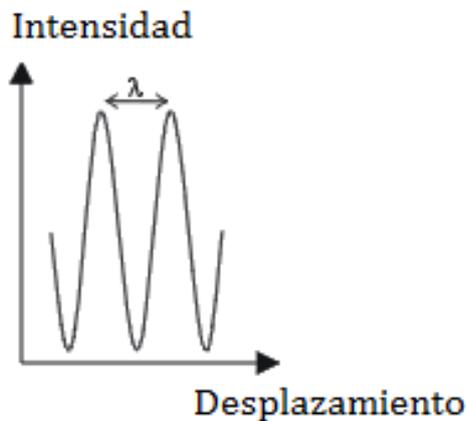


Figura 3. 9. Diagrama de Intensidad del haz contra desplazamiento de la superficie.

La tasa de cambio de la fase F es proporcional a la tasa de cambio de posición, que es la velocidad de vibración v de la superficie, lo que nos lleva a la ecuación bien conocida de la frecuencia Doppler f_D :

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \quad (3.17)$$

Debido a la naturaleza senoidal del detector de señal, la dirección de la vibración es ambigua. Hay dos formas de introducir la dirección:

Introducir un cambio en la frecuencia óptica a uno de los brazos del interferómetro para obtener una compensación en la velocidad virtual.

Añadir componentes de polarización y un fotodetector adicional de tal forma que a la salida del interferómetro una segunda señal homodina ocurra en cuadratura con la salida del primer fotodetector.

La solución que se implementa en el MSA-400 es la primera que de hecho es la más utilizada. En esta solución un modulador opto acústico (Bragg cell) se incorpora en uno de los brazos del interferómetro. La celda de Bragg [8] maneja señales de 40 MHz o mayores, y genera una señal de portadora de RF. La frecuencia del movimiento del objeto modula la señal de portadora. La velocidad del objeto determina el signo y la cantidad de frecuencias de desviación con respecto a la frecuencia central f_B . Este tipo de interferómetro es conocido como interferómetro heterodino.

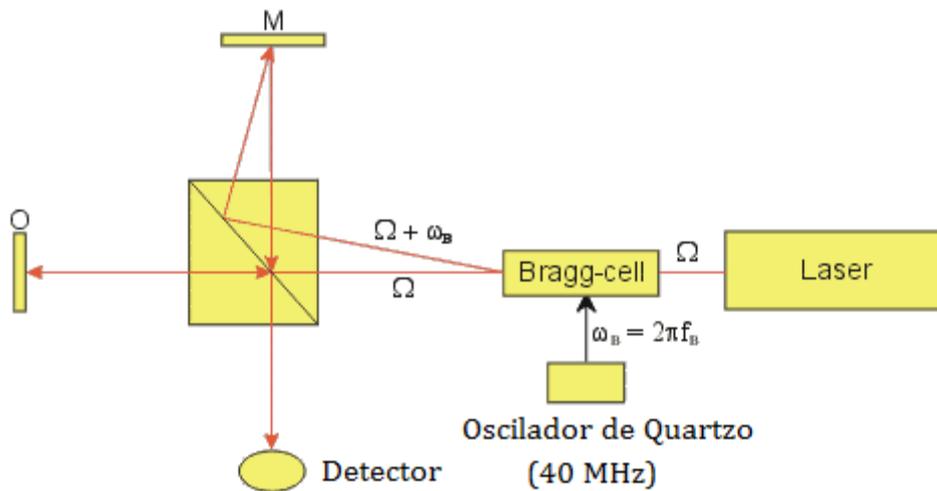


Figura 3.10. Diagrama de interferómetro heterodino.

Cuando introducimos el cambio de frecuencia f_B la intensidad en el detector cambia a:

$$I(t) = I_R I_M R + 2k\sqrt{I_R I_S R} \cos(2\pi[f_B - f_D]t + \Phi) \quad (3.18)$$

La solución heterodina tiene ventajas significantes. Debido a que sólo se transmiten señales de AC a altas frecuencias no existe ninguna perturbación de zumbidos y ruidos, que normalmente se presentan con otro tipo de fuentes de alimentación. Además, los efectos no lineales del fotodetector así como, las etapas del procesamiento de señales, no afectan el contenido de la modulación Doppler. La alta eficiencia de la celda de Bragg utilizada en el MSA-400 produce menos pérdidas que los polarizadores utilizados en la segunda solución.

La solución dos, conocida como la cuadratura del interferómetro homodino, se diseña añadiendo placas de retardo de onda, un divisor de haz polarizado y un segundo detector, como en el sistema óptico que se muestra en la figura 3.11.

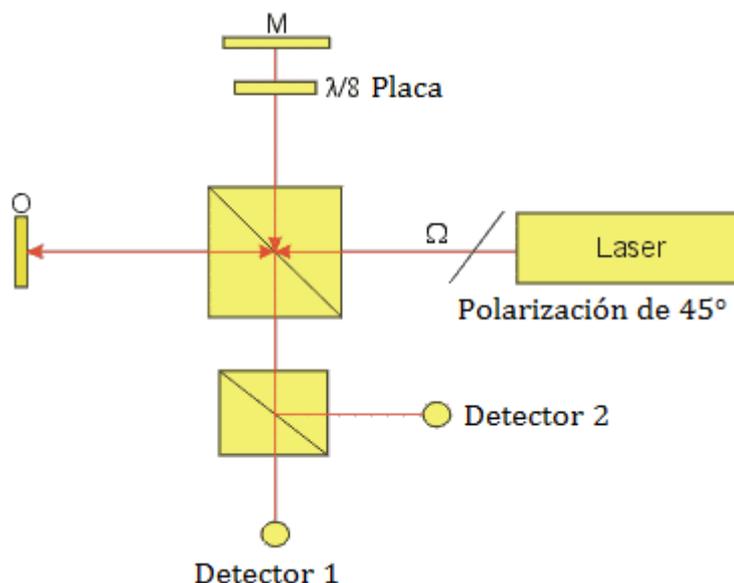


Figura 3.11. Diagrama de cuadratura del interferómetro homodino.

En dicho sistema el interferómetro utiliza la linealidad polarizada del láser orientada para dar una polarización de 45°. La luz en el brazo de referencia pasa dos veces a través de una placa retardadora de $\lambda/8$ y la luz regresa al divisor de haz circularmente polarizado. Esto se puede ver como el vector suma de dos estados de polarización ortogonales. Después de los detectores 1 y 2 se un divisor de haz que separa las dos componentes ortogonales. Lo que da como resultado una relación de cuadratura en los detectores (salidas de seno y coseno). Para decodificar las señales del interferómetro homodino las señales banda base de ambos detectores se introducen en un bloque modulador que genera una portadora de RF modulada con la ayuda de un oscilador de frecuencia f_B . Para la decodificación de señales se puede procesar la fase para producir la salida de desplazamiento o se puede realizar la demodulación FM para proporcionar la velocidad de vibración del objeto [9]. Hasta ahora se ha revisado a detalle las técnicas empleadas por el Analizador de Microsistemas MSA-400 para realizar la caracterización estática y dinámica de los MEMS.

Sin embargo, en el capítulo 4 se explica a detalle la caracterización estática y dinámica en específico de una selección de dispositivos

MEMS reportando los resultados obtenidos, así como las conclusiones a las que se han llegado con la realización de este trabajo.

3.5 Bibliografía y Referencias

1. **Polytec.** [http://www.polytec.com/usa/158_6392.asp?](http://www.polytec.com/usa/158_6392.asp)
[http://www.polytec.com/usa/158_6392.asp?](http://www.polytec.com/usa/158_6392.asp) [En línea] [Citado el: 10 de Agosto de 2008.]
2. **Bercu Bogdan, Montès Laurent, Morfouli Panagiota, Mathieu Nathalie.** *Simulation and 3D Characterization of Microsystems.* Grenoble, France : IMEP, ENSERG, Minatec, 2006.
3. **Polytec.** *Topography Measurement System software 2.0.* 41132-Man-TMS-Soft2.0-0206-01e.
4. **WIKIPEDIA.** [http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener-Khinchin_theorem.](http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener-Khinchin_theorem)
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener%E2%80%93Khinchin_theorem.](http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener%E2%80%93Khinchin_theorem) [En línea] [Citado el: 12 de Mayo de 2009.]
5. **Madou, M.J.** *Fundamentals of Microfabrication.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 1997.
6. **Lyshevski, Sergey Edward.** *Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-916-6.
7. **Polytec.** *Planar Motion Analyzer Software 2.3.*
8. **Wikipedia.** [http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator.](http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator)
[http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator.](http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator) [En línea] [Citado el: 14 de Mayo de 2009.]
9. **Polytec.** [http://www.polytec.com/usa/158_942.asp.](http://www.polytec.com/usa/158_942.asp)
[http://www.polytec.com/usa/158_942.asp.](http://www.polytec.com/usa/158_942.asp) [En línea] [Citado el: 1 de Mayo de 2009.]