

## **CAPÍTULO 2**

### **PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL MSA-400 PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA Y MOVIMIENTO DE LOS MEMS**

Una vez que se han diseñado y construido los Microsistemas Electro Mecánicos MEMS, es necesario hacer las respectivas pruebas de funcionamiento, como se hace con cualquier sistema, con el fin de verificar que los parámetros de diseño son reales y que el sistema va a funcionar tal y como fue diseñado. De no ser así, será necesario encontrar las razones correspondientes para hacer un nuevo diseño, y de esta forma optimizar los Microsistemas.

Estas pruebas comprenden la excitación eléctrica de los Microsistemas con el objetivo de obtener su respuesta mecánica bajo las condiciones de diseño. Dicha respuesta es medida como movimientos dentro y fuera del plano en forma de desplazamientos, giros o deformaciones de las partes móviles de los Microsistemas. Así mismo, es necesario realizar la medición de la superficie de las estructuras para comprobar que estén en buen estado, y de esta forma, asegurar que no se suscitará una ruptura en alguna de las estructuras de los Microsistemas debido a fracturas; así como tener conocimiento de la topografía general de las partes y de la estructura completa. Esto se hace principalmente para determinar las deformaciones o defectos de las superficies después de haber sido excitado el Microsistema.

Las mediciones anteriormente mencionadas son parte de lo que se llama caracterización de elementos y sistemas. La caracterización es necesaria en cualquier sistema ya construido para conocer los límites y condiciones de funcionamiento. En nuestro caso el objetivo de la caracterización es conocer las características topográficas y mecánicas de los MEMS.

Debido a la naturaleza de los Microsistemas electromecánicos, los métodos para la medición de sus características físicas, mecánicas y eléctricas deben ser especiales, ya que, son estructuras de escalas muy pequeñas, del orden de los micrómetros. Y no es posible utilizar las mismas técnicas ya conocidas y empleadas para los macro sistemas, pues podríamos destruir o dañar las micro estructuras.

Una forma de hacer el análisis de los microsistemas es el verificar la respuesta mecánica que se obtiene a partir de la excitación eléctrica y así conocer las

tolerancias y determinar si el Microsistema está funcionando de forma adecuada. Sin embargo, con dicho método no es posible determinar la causa del mal funcionamiento del Microsistema, pues no revela las condiciones físicas de las partes que conforman al Microsistema.

Así que, el método no invasivo que nos permitirá caracterizar la forma y deformaciones de los Microsistemas Electromecánicos está basado en la Interferometría Óptica, mientras que el método que nos permitirá analizar la respuesta mecánica de los microsistemas se basa en el Efecto Doppler.

## **2.1 Interferometría**

La interferometría, en general, es la utilización de la interferencia de dos ondas para llevar a cabo un tipo de medición. Típicamente, se hace una comparación entre dos ondas, una onda llamada “onda de referencia” y otra llamada “onda experimental”, para así medir con gran precisión las longitudes de onda de la luz.

La forma de las ondas depende del tipo de medición que se va a realizar. Por ejemplo, las ondas de sonido son utilizadas por interferómetros acústicos que miden las propiedades de diferentes gases y líquidos [1]. Las ondas de radio y microondas son utilizadas para la medición de la superficie de la Tierra y de otras superficies de cuerpos grandes usando sistemas de radares de apertura sintética (SAR) [2]. Las ondas de luz son más comúnmente utilizadas en laboratorios por los interferómetros ópticos, con el propósito de medir formas y deformaciones de un gran rango de objetos, desde dispositivos MEMS hasta puentes, aviones y edificios.

### **2.1.1 Breve Historia de la Interferometría**

La interferometría no fue inicialmente desarrollada para realizar mediciones de objetos a micro escala. De hecho, fue principalmente utilizada para mediciones astronómicas. Fue en 1880, que Albert A. Michelson, físico norteamericano, demostró a través de cálculos matemáticos y experimentos que la interferencia de dos haces de luz de una fuente distante permiten una medición aún más precisa de un objeto remoto que todos los métodos hasta entonces conocidos. En 1907 Michelson fue acreedor al Premio Nobel de Física por sus experimentos y descubrimientos en la Interferometría. Sin embargo, no fue

hasta 1920 que dicha técnica fue lo suficientemente perfeccionada para realizar mediciones con aplicaciones científicas. En el tiempo de Michelson, la interferometría fue utilizada para medir el diámetro de la primera estrella fuera de nuestro sistema solar [3].

La interferometría, sin embargo, no fue descubierta por Michelson. De hecho, el principio de la interferometría fue propuesto casi un siglo antes de que Michelson iniciara sus experimentos. Esto ocurrió a principios del siglo XIX, cuando Young [4] demostró experimentalmente el fenómeno de la interferencia óptica, y que Fresnel [4] lo explicó analíticamente usando la teoría de ondas. Fueron estas bases las que le dieron a Michelson el sustento para llevar a cabo sus experimentos.

Desde el tiempo en que Michelson realizara sus experimentos, numerosos avances y descubrimientos se han hecho entorno a la Interferometría. Se han desarrollado muchos métodos para la medición de formas y deformaciones, entre las que se incluyen: la interferometría con láser, interferometría de luz blanca y la interferometría de moteado o “interferometría Speckle” [5].

Un método que se deriva de la interferometría es la Holografía [6], que ha sido utilizada extensamente en las últimas cinco décadas para realizar mediciones muy precisas de deformaciones de estructuras debidas al tiempo.

Recientemente, los sistemas de medición han mejorado significativamente, tanto en términos de rango de aplicación como en calidad de resultados. Esto debido, entre otras cosas, a la comercialización del diodo láser durante las dos décadas pasadas, pues los sistemas de interferometría y holografía, han reducido su tamaño considerablemente, ya que, el tamaño del diodo láser es solo una fracción del tamaño del láser de gas utilizado anteriormente.

Además, el uso de computadoras equipadas con cámaras CCD y CMOS ha permitido realizar mediciones casi en tiempo real, por lo que no ha habido necesidad de desarrollar películas fotográficas para estas aplicaciones. Debido a que es posible importar directamente los datos de la medición a la computadora, y llevar a cabo el análisis y obtener los resultados en una mínima cantidad de tiempo, es decir, en minutos y no en días como sucedía con los métodos anteriores.

Así mismo, las computadoras nos brindan la posibilidad de desplegar los resultados cuantitativamente, con los que las formas y deformaciones absolutas se pueden medir y caracterizar.

Con casi dos siglos de desarrollo es hasta ahora que podemos aplicar técnicas de medición no invasivas ni destructivas lo suficientemente avanzadas para la caracterización de componentes a micro escala de las nuevas tecnologías emergentes como los Microsistemas Electromecánicos MEMS.

### **2.1.2 Interferómetros de frente de onda dividida**

La Interferometría se basa en la interferencia de dos ondas, que en nuestro caso serán ondas de luz, pues solo consideraremos la Interferometría óptica.

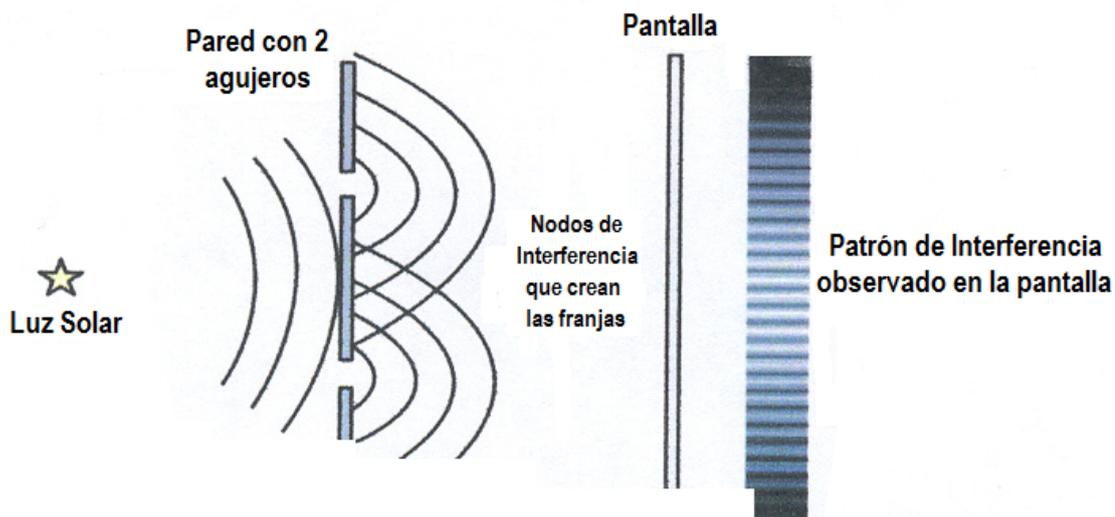
Existen muchos aparatos de interferometría que producen la interferencia de dos ondas de luz, sin embargo, todos estos aparatos siguen dos reglas fundamentales:

1. Las ondas de luz o los haces de luz solo interfieren si provienen de la misma fuente.
2. En el punto de interferencia, los haces de luz deben ser coherentes. La coherencia es una medida de la capacidad de interferir de las ondas de luz.

Existen dos grupos principales de interferómetros: los interferómetros de frente de onda dividido y los interferómetros de amplitud de onda dividida. Así mismo, existen dos tipos de coherencia óptica, coherencia espacial y coherencia temporal.

La demostración más antigua de la operación de un interferómetro es el experimento de la división del frente de onda construido y diseñado por Young a principios de 1800. Dicho experimento es comúnmente referido como “el experimento de Young”. La configuración consiste en una doble rendija, a través de las cuales pasa la luz dividiéndose en dos frentes de onda similares, que después se expanden e interfieren. Esta interferencia resulta en un patrón de franjas que puede ser observado en una pantalla. En la figura 2.1 se puede observar un esquema de dicho experimento.

Este tipo de interferómetros no se emplea en un sistema de microscopía interferométrica modular, por lo que no lo veremos más a fondo.



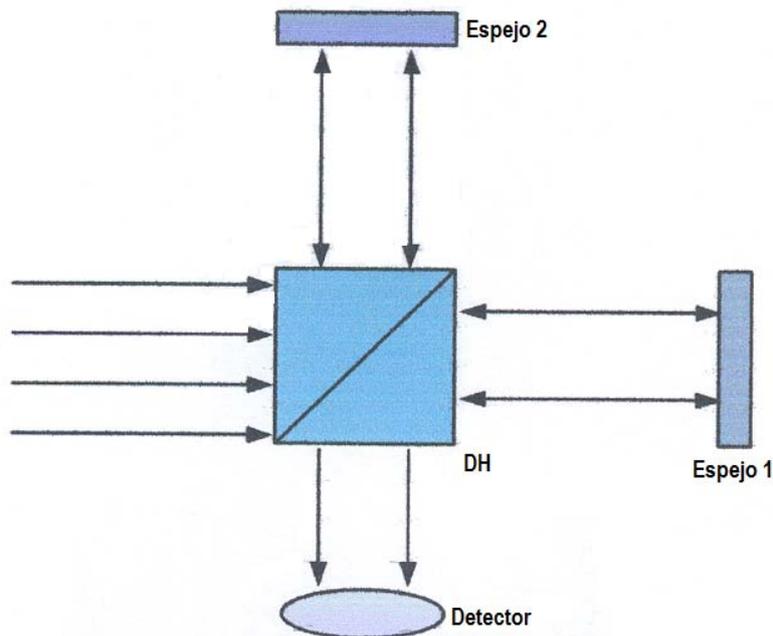
**Figura 2.1.** Experimento de la doble rendija de Young: Interferómetro de frente de onda dividida.

### 2.1.3 Interferómetros de amplitud de onda dividida

Los interferómetros de amplitud de onda dividida, como el interferómetro de Michelson que se muestra en la figura 2.2, son los interferómetros más empleados en los sistemas de medición.

Podemos explicar de una forma muy simple su funcionamiento. Un frente de onda, monocromática y colimada es dirigido a un divisor de haz, el cual, deja pasar el 50% de la luz, y el otro 50% reflejado ortogonalmente. Los haces son entonces reflejados a los espejos 1 y 2, y recombinados en el divisor de haz. La interferencia ocurre en el punto en el que los haces son recombinados en el divisor de haz y es observada por un detector.

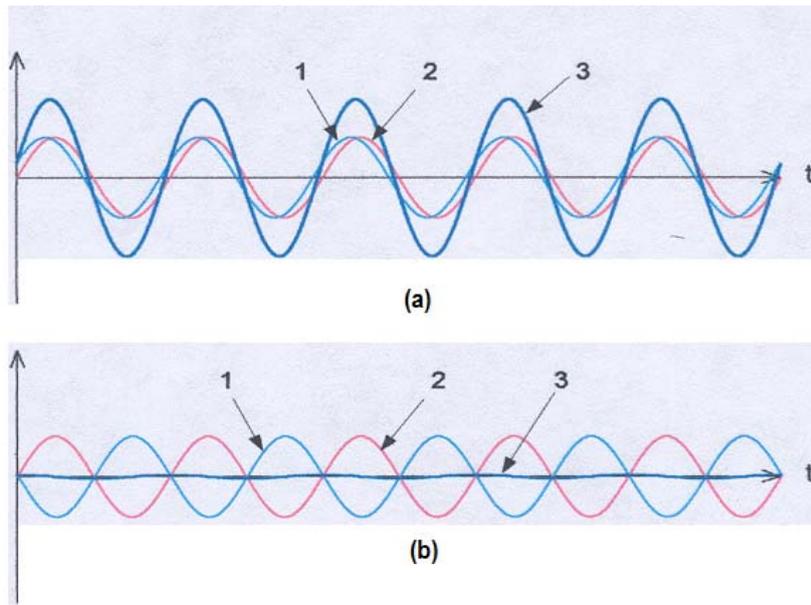
La diferencia entre el interferómetro con divisor de frente de onda y esta configuración es que en esta configuración no se hace interferencia de dos partes separadas de un frente de onda, sino que, la interferencia ocurre de dos ondas parciales originadas de una sola onda original.



**Figura 2.2.** Interferómetro de Michelson: Interferómetro de amplitud de onda dividida.

#### 2.1.4 Interferencia

La interferencia se basa en la naturaleza de las ondas de luz. Haciendo uso del principio de superposición, se puede decir que existe superposición de dos ondas en el mismo espacio y combinarán sus amplitudes para formar una nueva onda. Considerando las ondas que se muestran en la figura 2.3, cuando las ondas 1 y 2 tienen una fase muy parecida, se dice que dichas ondas interfieren *constructivamente* y forman una nueva onda 3. Cuando las ondas 1 y 2, tienen fases contrarias, o están en *contrafase*, se dice que interfieren *deconstructivamente*.



**Figura 2.3.** Interferencia de dos ondas a una frecuencia singular:  
 (a) Interferencia Constructiva, (b) Interferencia Destructiva.

Matemáticamente, podemos decir que la intensidad de cada onda es proporcional al cuadrado de sus amplitudes. Lo que nos permite decir que la intensidad  $I$ , de la onda 3, es [7]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (2.1)$$

Donde las intensidades  $I_1$  y  $I_2$  son de las ondas 1 y 2, respectivamente, y  $\Delta\phi$  es la diferencia de fase entre las dos ondas.

El término  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi$  es conocido como el término de interferencia. En el caso de la figura 2.4 (a), la diferencia de fases  $\Delta\phi$  es casi cero haciendo el término de interferencia significativo. Y en la figura 2.4 (b), el término  $\Delta\phi$  es aproximadamente  $\pi/2$  causando que la interferencia sea casi cero.

### 2.1.5 Coherencia

La coherencia es la habilidad de las ondas de luz para interferir. Se dice que dos puntos de una onda son coherentes cuando guardan una relación de fase constante; en otras palabras, cuando es conocido el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos es posible predecir el del otro.

Existen dos tipos de coherencia fundamentales: la coherencia espacial y la coherencia temporal.

La coherencia espacial básicamente describe que tan bien los interferómetros basados en la división de frente de onda formarán los patrones de franjas. Con mayor precisión, la coherencia espacial describe la habilidad de dos puntos distintos de una onda en el espacio para interferir en un promedio de tiempo determinado.

La coherencia temporal es una descripción de qué tan bien una onda puede correlacionarse con ella misma, en un instante diferente de tiempo [8].

Como los interferómetros utilizados para la caracterización de dispositivos MEMS son de frente de onda dividida, se considerará solo la coherencia temporal.

Recordando el interferómetro de Michelson de la figura 2.3 y la descripción de interferencia de la figura 2.4, se puede decir que dicho interferómetro producirá un patrón de interferencia perfectamente definido.

Sin embargo, este no es siempre el caso, la hipótesis mostrada en la figura 2.4 es que dos ondas que interfieren tienen una longitud infinita y una frecuencia constante. Esto, es una idealización pues ninguna fuente de luz es perfecta, ni siquiera el láser de un solo propósito lo hace.

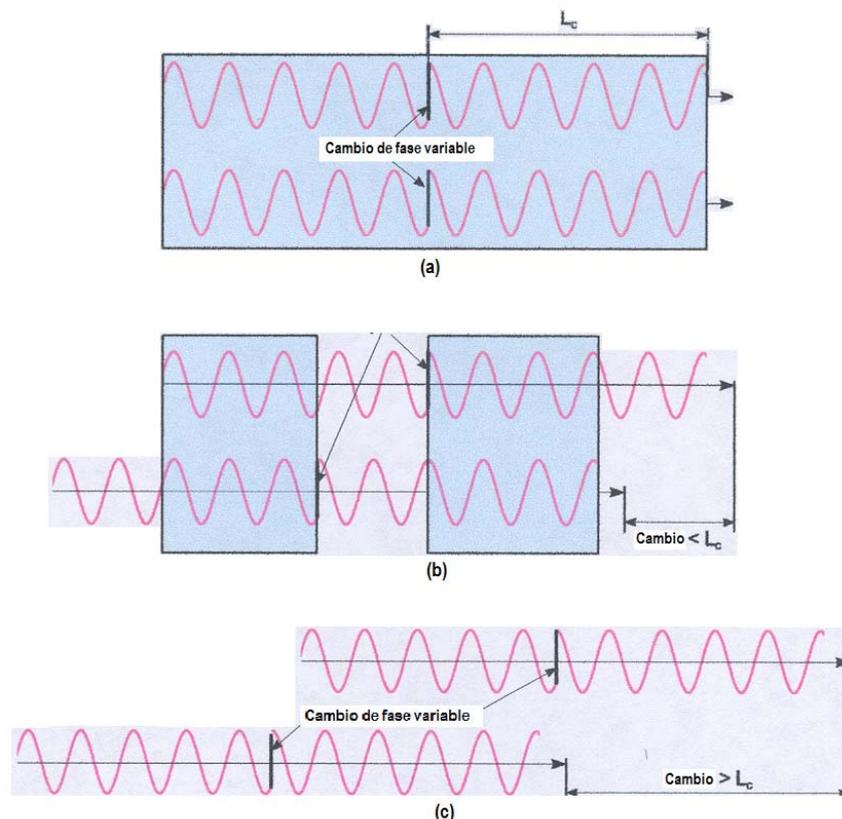
Así que, para poder representar las fuentes de luz reales, se supone que la salida está formada por trenes de onda con longitud finita y con cambios de fase aleatorios entre cada tren de ondas [9].

En la figura 2.4, se muestran dos trenes de ondas, como los reflejados por ambos espejos en el interferómetro de Michelson antes de ser recombinados en el divisor de haz. La figura 2.4 sólo muestra dos trenes de onda para cada brazo del interferómetro, pero como el detector que registra toda la información de las intensidades graba solo a tasa de video, un gran número de trenes de onda viajan juntos para realizar una grabación.

Se puede notar que la longitud de cada tren de onda es la longitud de coherencia  $L_c$  de la fuente de luz. Así mismo, entre cada tren de onda existe un cambio de fase aleatorio o una discontinuidad, que simula la fuente de luz real.

En el caso de la figura 2.4 (a), el interferómetro está perfectamente alineado: las distancias entre el divisor de haz y cada uno de los espejos son idénticas. Los cambios abruptos de fase aleatorios ocurren en el mismo instante de

tiempo. Los cuadros que rodean a los trenes de onda indican que la interferencia ocurre con gran visibilidad, debido al alineamiento perfecto. La intensidad observada por el detector es todavía ideal en este caso, y está dada por la ecuación (1).



**Figura 2. 4.** (a) Ambos trenes de onda están alineados, (b) El cambio de fase es menor a la longitud de coherencia, (c) El cambio de fase es mayor a la longitud de coherencia.

La figura 2.4 (b) representa el caso en el que el interferómetro se encuentra parcialmente desalineado, pues existe una distancia diferente entre uno de los espejos y el divisor de haz. Para este caso, sin embargo, la diferencia en la longitud de camino es menor a la longitud de coherencia de la fuente de luz. Lo que permite que algo de interferencia ocurra.

Las regiones sombreadas son las únicas áreas en las que los primeros trenes de onda se alinean con los segundos trenes de onda. Estas áreas son las únicas en las que la interferencia se mantiene constante a través del tiempo.

Fuera de estas áreas sombreadas, todavía existirá interferencia entre los trenes de onda, pero como el cambio de fase entre los trenes de onda es aleatorio, la interferencia también será aleatoria a través del tiempo. Y si se tiene una interferencia aleatoria, en consecuencia se reduce notoriamente el contraste del patrón de franjas.

En el caso ideal,  $I_1 = I_2$  y la ecuación (1) se convierte en:

$$I = I_1 + I_2 + 2V\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (2.2)$$

Donde  $V$  es la visibilidad del patrón de franjas, y tiene un rango de 0 a 1. La visibilidad del patrón de franjas se define como: [9]

$$V = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{i}n}} \quad (2.3)$$

Donde  $I_{m\acute{a}x}$  e  $I_{m\acute{i}n}$  son las intensidades de las franjas iluminadas y las franjas oscuras, respectivamente. Observando la figura 2.4 (b), se puede decir que  $V \approx 0.6$  es el contraste del patrón de franjas, y que la alineación del interferómetro es cercana al 60% respecto al alineado en la figura 2.4 (a).

En el caso de la figura 2.4 (c), la diferencia entre la longitud de camino y los dos brazos del interferómetro es mayor a la longitud de coherencia de la fuente de luz. Cuando esta situación se suscita las franjas no se generan. Como ninguna porción de los trenes de onda se alinean, ocurre una interferencia completamente aleatoria.

El término  $\Delta\phi$  cambia aleatoriamente de 0 a  $2\pi$  y, en un punto determinado en el tiempo la función coseno de este término se va a cero, cambiando la ecuación (2.2) en:

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.4)$$

Dicho resultado de intensidad permanece constante y la interferencia no ocurre.

Muchas veces es deseable conocer el valor de la longitud de coherencia de la fuente de luz de un interferómetro. Para este propósito, se considera la coherencia temporal como  $\tau_c$ , en el punto en el que la diferencia de la longitud de camino hace la visibilidad del patrón de franjas cero: [9]

$$\tau_c = \frac{L_c}{c} = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (2.5)$$

Donde  $L_c$  es la longitud de coherencia,  $c$  es la velocidad de la luz, y  $\Delta\nu$  es el ancho de banda en frecuencia.

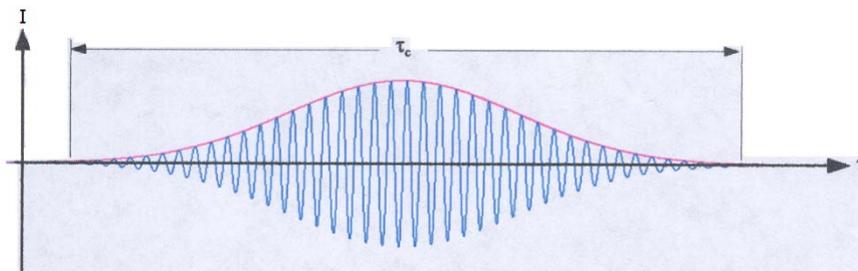
La longitud de coherencia  $L_c$  también puede ser definida como la distancia que la onda viaja en el tiempo  $\tau_c$ .

Para la construcción de los interferómetros, es necesario conocer la longitud de coherencia, por lo que, la ecuación (2.5) se puede reescribir en términos de longitud de onda:

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} = \left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right|^{-1} \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) se usa para determinar con gran precisión las longitudes de camino de un interferómetro necesarias para la alineación y para que la interferencia pueda ser observada.

La figura 2.5 es la representación gráfica del rango de coherencia de un LED. Cuando se usa un LED en el interferómetro, los dos brazos necesitan ser alineados para que las franjas mantengan un alto contraste. El rango de coherencia temporal puede ser más corto para una fuente de luz blanca y mucho más larga para fuentes de luz con láser.



**Figura 2.5.** Representación gráfica de una franja a lo largo del rango de coherencia temporal.

## 2.2 Configuraciones de los Interferómetros

Los dispositivos MEMS son típicamente fabricados con silicio, que es un material altamente reflejante en el espectro visible [10], por lo que, ha sido necesario implementar interferómetros retro-reflectantes.

Los interferómetros retro-reflectantes utilizan directamente el reflejo de la luz fuera del objeto que se mide. El objeto a medir es iluminado y observado a través del eje normal a la superficie del objeto observado.

Este tipo de interferómetro es el más adecuado para medir objetos lisos altamente reflectantes, como lo son los dispositivos MEMS.

### 2.2.1 Interferómetro de Michelson

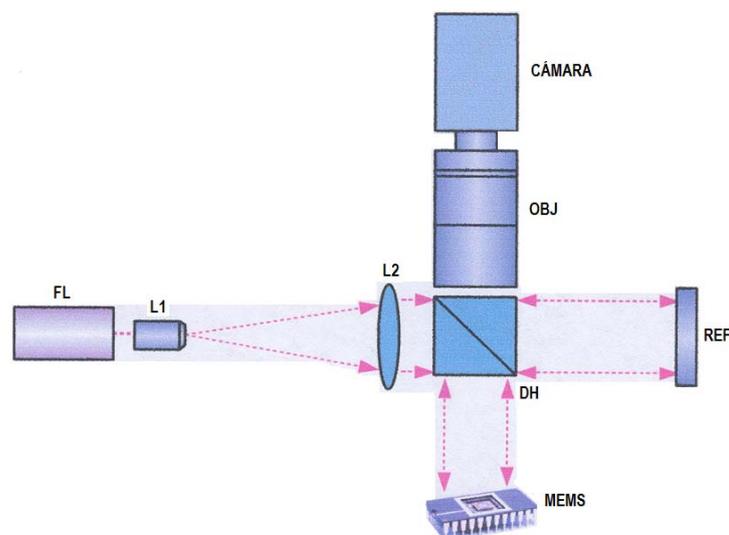
El interferómetro de Michelson es uno de los interferómetros más versátiles desarrollados hasta ahora y uno de los diseños más antiguos, pero no por ello se ha dejado de emplear; por el contrario, se han realizado muchas variaciones que en la actualidad son de las más empleadas para diferentes propósitos.

Entre estas modificaciones se puede mencionar el interferómetro de fase escalada de Michelson que es capaz de realizar mediciones de alta precisión de superficies y formas, de componentes altamente reflectantes.

En la figura 2.6 se muestra el esquema de un interferómetro de Michelson usado hoy en día. Este interferómetro cuenta con una fuente de luz monocromática coherente, ya sea un láser o un LED (FL), el haz que es generado por el LED expandido por el primer lente ( $L_1$ ) y colimado por el segundo lente ( $L_2$ ). Este haz expandido y colimado es más adelante dividido en dos haces por el divisor de haz (DH), y cada parte es enviada a dos caminos o trayectorias ortogonales al dispositivo MEMS y al espejo de referencia (REF). Estos dos haces son reflejados nuevamente y recombinados por el divisor de haz para así formar un patrón de interferencia, que es proyectado por el objetivo imagen (OBJ) y grabado por la cámara.

Cuando el camino que uno de los haces recorre varía con respecto del otro, existe una diferencia de fase cuando estos haces son recombinados. Dicha diferencia de fase resulta en una interferencia constructiva y destructiva, produciendo bandas iluminadas y oscuras, conocidas como franjas de interferencia. Las franjas de interferencia tienen un significado similar a las líneas de contorno del mapa topográfico, es decir, representan desviaciones en la elevación (forma) del objeto.

Para poder adquirir datos cuantitativos de estas franjas de interferencia, se realiza un escalamiento de fase en uno de los brazos del interferómetro. El escalamiento de fase es conocido como un movimiento de una componente en un intervalo de tiempo en una dirección conocida que determina el camino o trayectoria del haz. Esto normalmente, se hace a través de un transductor piezoeléctrico (TPZ), adjunto al objeto o al espejo de referencia.



**Figura 2.6.** Esquema de un interferómetro de Michelson.

### 2.2.2 Interferómetro de Mirau

El Interferómetro de Mirau es un diseño común, utilizado por los microscopios de alta magnificación. Esto se dice por que la configuración puede tener una magnificación de más de 50x, en comparación con el interferómetro de Michelson que apenas alcanza magnificaciones alrededor de 5x.

En la figura 2.7 se muestra un esquema de la configuración del Interferómetro de Mirau. La configuración tiene una fuente de luz (FL), usualmente un LED o una lámpara de luz blanca, con salida divergente. La luz generada es colimada por un sistema de lentes (L1) y es directamente dirigida hacia abajo por el divisor de haz. La luz es enfocada por la lente L2 hacia el dispositivo MEMS bajo investigación. Un divisor de haz de placa (DH) refleja la mitad de la luz a un pequeño espejo de referencia (REF) y transmite la mitad de la luz al dispositivo MEMS. Tanto el espejo de referencia (REF) como el dispositivo MEMS reflejan la luz de regreso al divisor de haz de placa donde los dos haces son recombinados para formar un patrón de interferencia que tendrá el mismo significado que para el interferómetro de Michelson.

Esta imagen es reflejada hacia arriba, a través de la lente L2 y el divisor de haz (DH), para ser enfocada por la lente L3 en un dispositivo que puede ser una cámara, captura la imagen.

El Interferómetro de Mirau es usualmente utilizado en interferómetros de escaneo vertical, porque puede ser fácilmente alineado. El sistema de lentes L2, el espejo de referencia y el divisor de haz de placa pueden estar contenidos dentro del objetivo de un microscopio. Debido a que parte del sistema está claramente contenido en un objetivo, la alineación no es más complicada que la hecha para un microscopio para dispositivos MEMS.

Los objetivos del microscopio, con aumentos de 10x o superior, suelen tener una profundidad de campo de varios micrómetros o menos; así que, cuando el objetivo Mirau es enfocado, la longitud de camino que la luz recorre desde el dispositivo MEMS hasta el divisor de haz de placa es la misma que la de la referencia a la del espejo de referencia. Cuando las longitudes de camino son alineadas con precisión, una fuente de luz no-monocromática puede todavía lograr interferencia a través de un rango limitado. Este principio es utilizado en la interferometría de escaneo o barrido vertical.

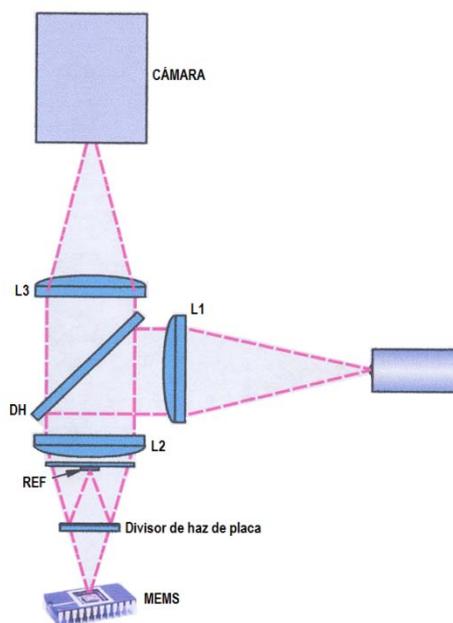


Figura 2. 7. Esquema de un interferómetro de Mirau.

### 2.2.3 Interferómetro de luz blanca de escaneo vertical

La interferometría de luz blanca de escaneo o barrido vertical es una variación de la interferometría de escaneo vertical, que utiliza una fuente de luz blanca

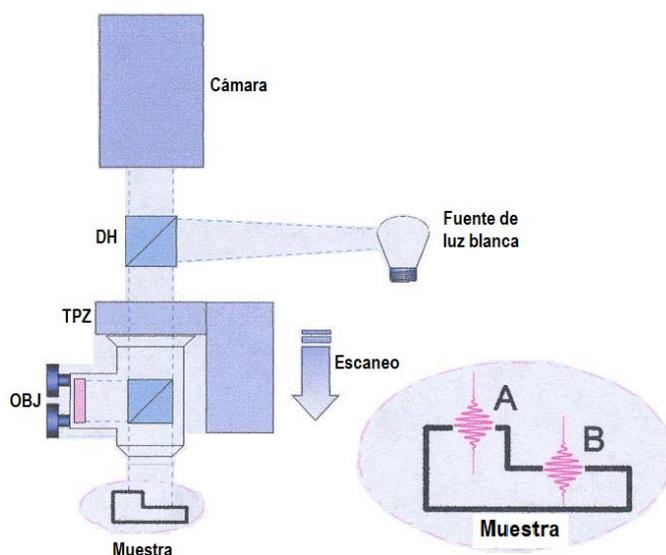
de banda ancha y un método de seguimiento de coherencia, para medir la forma de los objetos con alturas que los interferómetros de incremento de fase convencionales no pueden medir [11].

La ventaja de un sistema con interferómetro de luz blanca de escaneo vertical sobre los sistemas con interferómetros Mirau o Michelson de incremento de fase, es que dicho sistema puede medir escalones en la muestra, como las múltiples capas de los dispositivos MEMS en una sola medición. Tal característica es muy importante para la caracterización de dispositivos MEMS, que es el objetivo del desarrollo de este tipo de sistemas.

En los sistemas con interferómetro de luz blanca de escaneo vertical, las franjas de la interferencia no solo son generadas cuando la longitud de camino del objeto, de la referencia y la longitud de los brazos del interferómetro coinciden con la longitud de coherencia de la fuente de luz. La longitud de coherencia de la fuente de luz blanca es muy corta, típicamente de un micrómetro o menor. Esta limitación de longitud de coherencia es la explotada para la realización de mediciones con interferómetros de luz blanca.

En la figura 2.8 se muestra la configuración de un interferómetro de luz blanca de escaneo vertical. En esta configuración, en particular, se muestra la utilización de un interferómetro de Michelson construido dentro del objetivo del microscopio, con magnificaciones de 2.5x y 5x. Es posible alcanzar mayores magnificaciones con el uso de objetivos con interferómetro de Mirau.

En esta configuración, la luz es obtenida de un foco de halógeno de luz blanca, dirigida hacia el objetivo interferométrico (OBJ) a través del divisor de haz (DH). El transductor piezoeléctrico (TPZ) escanea el objetivo con una tasa constante de 250  $\mu$ s. Debido a que se enfocan diferentes capas de la muestra, los píxeles que forman la imagen se empiezan a modular (A y B de la figura 2.8). Las imágenes se adquieren en intervalos constantes conforme el transductor piezoeléctrico escanea la muestra. Dicho proceso produce una pila de imágenes que se procesan digitalmente para la plena representación tridimensional de la superficie de un dispositivo MEMS.



**Figura 2.8.** Esquema de un interferómetro de luz blanca de escaneo vertical.

### 2.3 El Estroboscopio

El estroboscopio es un instrumento que permite visualizar un objeto que está girando como si estuviera parado o girando muy lentamente. Permite encender y apagar luces, en un lapso determinado, la cantidad de veces que uno desee. Este dispositivo es muy utilizado en clubes nocturnos y en películas para dar la sensación de movimientos rápidos.

En esencia un estroboscopio está dotado de una lámpara, normalmente del tipo de descarga gaseosa de xenón, similar a las empleadas en los flashes de fotografía, con la diferencia de que en lugar de un destello, emite una serie de ellos, consecutivamente, con una frecuencia regulable. Si tenemos un objeto que está girando a  $N$  revoluciones por minuto y regulamos la frecuencia del estroboscopio a  $N$  destellos por minuto e iluminamos con él el objeto giratorio, éste, al ser iluminado siempre en la misma posición, aparecerá a nuestros ojos como parado.

Si la frecuencia de los destellos no coincide exactamente con la de giro, pero se aproxima mucho a ella, veremos el objeto moverse lentamente, hacia adelante o hacia atrás según que la frecuencia de destello del estroboscopio sea, respectivamente, inferior o superior a la de giro.

En la actualidad el estroboscopio se sigue utilizando para verificar la velocidad de giro de máquinas y motores de diversas clases, sin necesidad de efectuar acoplamiento eléctrico o mecánico alguno. De manera inversa, si pegamos en un disco giratorio diversas imágenes correspondientes a distintas fases del movimiento de un objeto (por ejemplo un muñeco) y lo iluminamos con el estroboscopio de tal forma que se produzca un destello cada vez que pase ante nosotros una imagen, quedando el plato sin iluminar durante el espacio que media entre una imagen y otra, el resultado será que veremos el objeto en movimiento. En este principio, denominado *efecto estroboscópico*, están basadas las películas de dibujos animados. El estroboscopio fue inventado por el austríaco Simon von Stampfer el mismo año en que Joseph Plateau daba a conocer su phenakistoscopia [12].

### **2.3.1 Microscopio con video estroboscópico**

El microscopio con video estroboscópico hace uso de las características especiales del estroboscopio, pues resulta esencial para la visualización de movimiento de piezas mecánicas imposibles de observar por el ojo humano. Para la caracterización de dispositivos MEMS resulta muy útil la aplicación de un microscopio equipado con video estroboscópico, ya que algunas piezas móviles de los dispositivos MEMS se mueven a velocidades muy altas que son grabadas con el video que con la luz estroboscópica pueden ser observados con gran simplicidad.

## **2.4 El Vibrómetro y el Efecto Doppler**

El Efecto Doppler describe la variación de la frecuencia de una onda captada por un observador cuando la fuente que lo genera, el mismo observador o ambos están en movimiento.

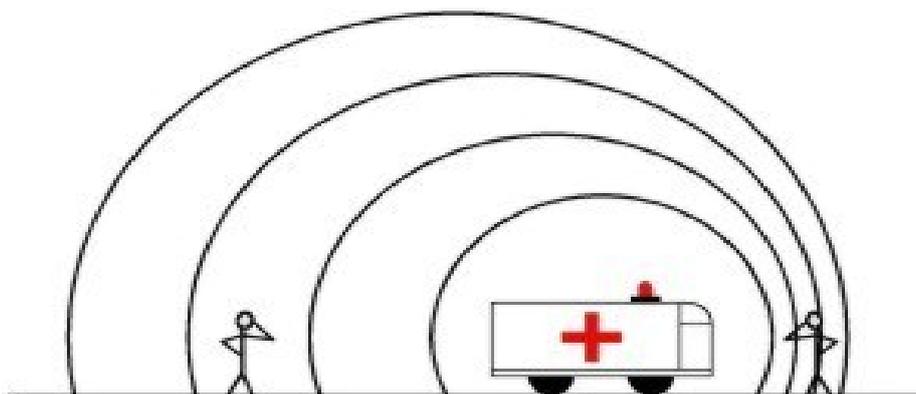
Este fenómeno fue analizado por Christian Doppler (1803-1853) para explicar la variación de la frecuencia de las ondas luminosas que provienen de los cuerpos celestes. Doppler propuso este efecto en 1842 en una monografía titulada *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels* ("Sobre el color de la luz en las estrellas binarias y otros astros").

Su hipótesis fue investigada en 1845, para el caso de las ondas sonoras, por el científico holandés Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot, confirmando que el

tono de un sonido emitido por una fuente que se aproxima al observador es más aguda que si la fuente se aleja.

Hippolyte Fizeau descubrió independientemente el mismo fenómeno en el caso de ondas electromagnéticas en 1848. En Francia, este efecto se conoce como “Efecto Doppler-Fizeau” [13].

En el caso del efecto Doppler para ondas sonoras, como se muestra en la figura 2.9, la variación de las ondas depende de que sea la fuente o el receptor el que esté en movimiento a una velocidad  $v$ . Dicha diferencia se debe a que existe un medio (en general, el aire) respecto al cual tiene lugar el movimiento; por lo que puede distinguirse el movimiento de la fuente o del receptor respecto al aire en calma. Esta diferencia entre el movimiento de la fuente o del receptor no puede extenderse para analizar este efecto en el caso de la luz o de las ondas electromagnéticas en el vacío [6].



**Figura 2.9.** El efecto Doppler para ondas sonoras.

En el caso del espectro visible de la radiación electromagnética, si el objeto se aleja, su luz se desplaza con longitudes de onda más largas, desplazándose hacia el rojo dentro del espectro de luz. Si el objeto se acerca, su luz presenta una longitud de onda más corta, desplazándose hacia el azul. Esta desviación hacia el rojo o el azul, es muy leve, incluso para velocidades elevadas, como las velocidades relativas entre estrellas o entre galaxias, y el ojo humano no puede captarlo, solamente medirlo indirectamente utilizando instrumentos de medición como espectrómetros. Si el emisor se moviera a fracciones significativas de la velocidad de la luz, entonces sí sería apreciable de forma directa la variación de la longitud de onda.

### 2.4.1 El vibrómetro de láser Doppler

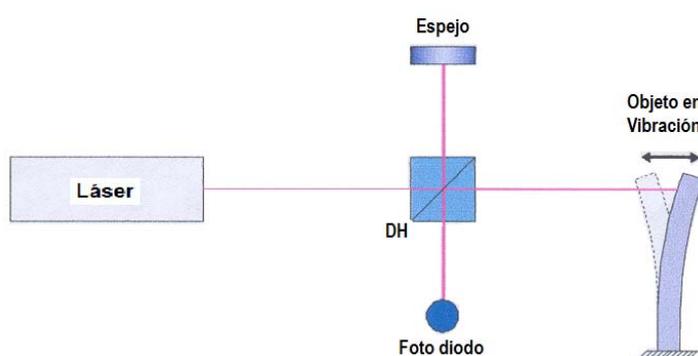
El vibrómetro es un interferómetro basado en la configuración de Michelson solo que emplea la técnica conocida como Vibrómetro de Láser Doppler.

En la actualidad, existen ya muchos vibrómetros de Láser Doppler comercialmente accesibles, empleados para diversas aplicaciones desde la detección de vibraciones para macro estructuras mecánicas, como automóviles, puentes y edificios; hasta micro sistemas como los dispositivos MEMS.

Dichos sistemas hacen uso del efecto Doppler de la luz que se refleja fuera de un objeto que vibra. Dicha técnica permite obtener un punto preciso por medio del cual será posible medir la velocidad a la que el objeto está vibrando.

Debido a la muy alta frecuencia que la luz de láser posee, aproximadamente  $4.74 \times 10^{14}$  Hz, la medición directa del efecto Doppler en un instante determinado no es tarea fácil. El sistema usa un interferómetro para demodular la frecuencia Doppler del láser objeto interfiriéndolo con un láser de referencia estático.

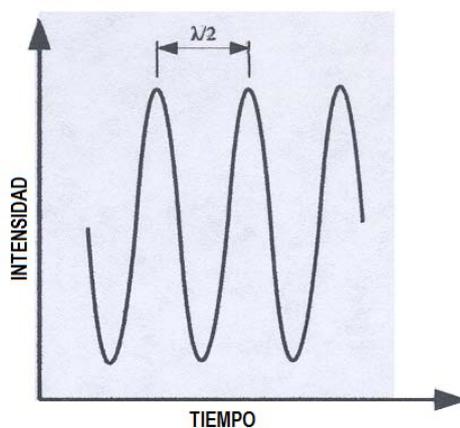
En la figura 2.10 se muestra la configuración fundamental de un vibrómetro, que resulta muy similar al interferómetro de Michelson. El haz del láser es dividido en dos partes o brazos, que actúan como un haz de referencia y un haz objeto. El haz objeto apunta al objeto vibrante, y la luz reflejada es recombinada en el divisor de haz con la luz de referencia.



**Figura 2.10.** Esquema de un interferómetro con vibrómetro.

Cuando el objeto vibra el efecto Doppler se origina a la frecuencia de la luz láser del haz objeto. Cuando interferimos dicha luz con la luz de referencia ocurrirá un salto en la frecuencia que es igual a la diferencia entre la señal de referencia y la señal del objeto. Lo anterior, es medido por un fotodiodo como variaciones en la intensidad (Figura 2.11).

Los cambios en la intensidad de la luz con respecto al tiempo se deben al salto en la frecuencia causado por la vibración del objeto. Y con el interferómetro de Michelson, la distancia de pico a pico de esta señal es igual a la mitad de la longitud de onda ( $\lambda$ ) del láser.



**Figura 2.11.** Cambios de la Intensidad con respecto al tiempo.

Los principios de operación que se revisaron en este capítulo son los desarrollados desde hace más de dos siglos y debido a que la tecnología utilizada debe ser no invasiva, los principios básicos utilizados son principalmente ópticos, como son la interferencia óptica, el Efecto Doppler, luz de estrobos, y estos combinados con la tecnología ya desarrolla como son los interferómetros de Michelson y Mirau, el vibrómetro, las cámaras CCD y el software necesario para el procesamiento digital de imágenes, dieron como resultado la tecnología no invasiva utilizada en la actualidad para la caracterización de MEMS.

En conclusión, se puede decir que los avances tecnológicos de la actualidad son producto de las investigaciones hechas hace más de un siglo, cualquier aplicación actual tiene como antecedentes principios científicos de investigaciones realizadas desde mucho tiempo atrás.

Ahora que ya se han revisados los principios que fundamentan la operación del Analizador de Microsistemas MSA-400 empleado para la caracterización estática y dinámica de los dispositivos MEMS, en el siguiente capítulo realizaré una revisión detallada del Analizador de Microsistemas MSA-400.

## 2.5 Bibliografía y Referencias

1. **Lee, J.** *Underwater acoustic interferometer*. Panama City, FL, USA : IEEE, 1970.
2. **Sandia National Laboratories.** Synthetic Aperture Radar. *sitio web de Sandia National Laboratories*. [En línea] [Citado el: 23 de 04 de 2008.] <http://www.sandia.gov/radar/whatis.html>.
3. **Lowell Observatory.** <http://www.lowell.edu>. [En línea] 2008.
4. **Wikipedia.** Wikipedia the free encyclopedia. [En línea] [Citado el: 23 de 04 de 2008.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Abraham\\_Michelson](http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Abraham_Michelson).
5. [http://es.wikipedia.org/wiki/Interferometr%C3%ADa\\_de\\_moteado](http://es.wikipedia.org/wiki/Interferometr%C3%ADa_de_moteado). [http://es.wikipedia.org/wiki/Interferometr%C3%ADa\\_de\\_moteado](http://es.wikipedia.org/wiki/Interferometr%C3%ADa_de_moteado). [En línea] [Citado el: 15 de Octubre de 2008.]
6. **Lándsberg S. G.** *Óptica Tomo I*. Moscú : MIR Moscú, 1983.
7. **T., Robinson D. W. y Reid G.** *Interferogram Analysis*. Bristol, Inglaterra : Institute of Physics, 1993.
8. **T., Kreis.** *Holographic interferometry principles and methods*,. Berlín, Alemania. : Akademie Verlag, 1996.
9. **J., Gåsvik K.** *Optical Metrology 3rd Ed*. Sussex, Inglaterra. : Wiley, 2002.
10. **H., Jones M. H. y Jones S.** *Optical properties of silicon*. Fredericksburg, VA. : Virginia Semiconductor, 2002.
11. **C., Harasaki A. Schmit J. y Wyant J.** *"Improved vertical-scanning"*, *Applied Optics*. 2000.

12. **Wikipedia.** Wikipedia the free encyclopedia. [En línea] [Citado el: 23 de 04 de 2008.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Edward\\_Morley](http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Morley).

13. **Wikipedia free encyclopedia.**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Corrimiento\\_doppler](http://es.wikipedia.org/wiki/Corrimiento_doppler).

*[http://es.wikipedia.org/wiki/Corrimiento\\_doppler](http://es.wikipedia.org/wiki/Corrimiento_doppler)*. [En línea] [Citado el: 15 de Octubre de 2008.]