

CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS TERMONEUMÁTICAS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA ÓPTICA

por

Julio Enrique Duarte¹, Flavio Humberto Fernández Morales¹
& Mauricio Moreno Sereno²

Resumen

Duarte, J. E., H. Fernández & M. Moreno: Caracterización de membranas termoneumáticas mediante interferometría óptica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31** (118): 79-87, 2007. ISSN 0370-3908.

La caracterización de dispositivos que modifican su estructura geométrica exige disponer de una técnica de medida precisa, fiable, eficiente y que se ajuste a los requerimientos experimentales. En este sentido, se ilustra el Interferómetro de Michelson como dispositivo para la medición de deflexiones en micromembranas de silicio actuadas termoneumaticamente. Se obtuvieron los anillos de interferencia debido a las modificaciones de la superficie de las membranas los cuales, al ser contabilizados, permiten establecer el comportamiento dinámico de la membrana. La estructura de prueba tiene un área de $4000 \mu\text{m}^2$, $14 \mu\text{m}$ de grosor y una cavidad de actuación con una profundidad de $300 \mu\text{m}$.

Palabras clave: Microbomba, dispositivos termoneumáticos, interferometría, microactuadores.

Abstract

In order to characterize a device that modify their geometrical structure is desirable to dispose of a measurement technique reliable, precise and good-resolution that can be easily adapted to the experimental conditions. In this way, the Michelson interferometer is shown as a useful device to measure small deflections on a thermo-neumatically actuated silicon micromembrane. The interference rings obtained by the membrane surface modifications are counted to allow the estimation of the membrane dynamical behavior. The structure under test has an area of $4000 \mu\text{m}^2$, $14 \mu\text{m}$ thickness and $300 \mu\text{m}$ of cavity height.

Key words: Micropump, thermo-neumatic devices, interferometry, microactuator.

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama. Carrera 18 Calle 22, Duitama, Boyacá, Colombia. Correo electrónico: julioenriqued1@gmail.com y flaviofm1@gmail.com Teléfono: ++ 09 8 7604100, Ext. 212.

² Universidad de Barcelona, Departamento de Electrónica. c./ Marti y Franques 1, 0828, Correo electrónico: mmoreno@el.ub.es Barcelona, España.

Introducción

En la actualidad existen un gran número de microdispositivos cuyo principio de funcionamiento aprovecha las propiedades mecánicas del silicio (Si), entre otros se encuentran los acelerómetros, microbombas y microespejos. Estos dispositivos presentan como principal característica la de responder a una señal eléctrica y/o a una radiación de excitación, con una modificación de su geometría. Además, son elementos que en los últimos años, y gracias al avance del micromecánizado del Si, han venido a sumarse a los actuadores tradicionales (Yamashita, 1998; Ruiz *et al.*, 1996; Duarte *et al.*, 2005).

La deformación en la geometría de los microactuadores (entendida como abultamiento, alargamiento, deflexiones y curvamientos), es del orden de unas decenas de micras y su caracterización debe obedecer a alguna técnica fiable, factible, con buena resolución y de costo razonable. Para la medida de pequeños desplazamientos existen básicamente tres categorías de técnicas de medida:

- Eléctricas: Capacitivas, piezoeléctricas, piezoresistivas, de corriente túnel y microondas.
- Magnéticas: Magnetización, magneto-elástica y de campo magnético externo.
- Ópticas: Técnicas de espacio libre y técnicas de guía de onda que utiliza fibra óptica y dispositivos de óptica integrada (Tabib-Azar, 1995).

El problema que aquí se plantea es la medida de la deflexión de una membrana de Si termoneumática, para lo cual se escogió la interferometría de Michelson que corresponde a una técnica óptica de espacio libre. La deflexión de las membranas se consigue aplicando una diferencia de potencial a la resistencia calefactora ubicada en la cavidad de actuación. Al calentar el aire encerrado en la cavidad se incrementa la presión dentro de la misma, generando a su vez la deflexión de la membrana: a esta forma de operación se le denomina actuación termoneumática. A continuación se hace una breve descripción de la estructura de la membrana, de la técnica de medida y de los resultados obtenidos.

Materiales y Métodos

Membrana Termoneumática

Las membranas de Si se utilizan, entre otros, como microactuadores en bombas que manejan pequeños volúmenes de fluido. Uno de los principios de actuación más conocidos es el termoneumático que consiste en disponer

de una cavidad de aire, debidamente sellada, a la cual se le varía la temperatura para conseguir un incremento de la presión interna causando una deflexión en la membrana que sirve de obturador para el fluido circulante.

La figura 1 presenta el corte transversal de una microbomba, donde se observan los distintos componentes que la conforman:

- Unidad de actuación, que consta de la membrana y su unidad calefactora.
- Válvulas, situadas en los orificios de entrada y salida del líquido.
- Cavidad de bombeo, donde la membrana actúa sobre el fluido.
- Canales de entrada y salida.

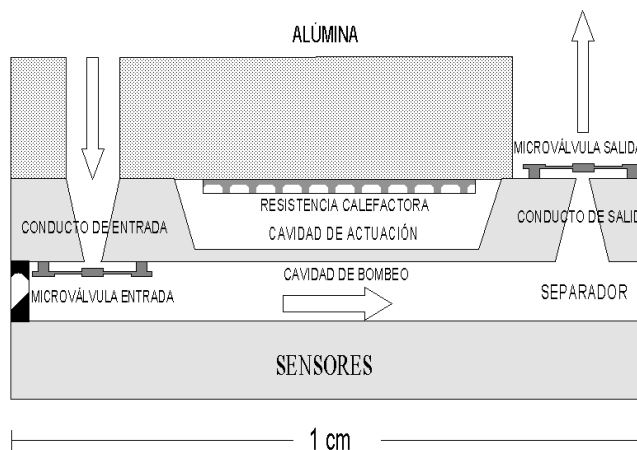


Figura 1. Corte transversal de una microbomba con actuación termoneumática.

La unidad de actuación: La cavidad de aire se consigue mediante ataque anisotrópico del Si con KOH, que es una técnica de fabricación; con este ataque también se configura la membrana. El ataque se controla por tiempo en función del grosor deseado, que puede ser del orden de decenas de micras. La cavidad se cierra mediante un substrato de alúmina (Al_2O_3) que se adhiere al silicio mediante resina epóxica. Esta unión ha de ser perfectamente hermética, ya que de lo contrario no permitiría los cambios de presión necesarios en esta cavidad. El aire se calienta aplicando una diferencia de potencial sobre la resistencia calefactora de Ta_2N , de 0.1 mm de grosor, depositada sobre la alúmina. Los contactos eléctricos de la

resistencia van al exterior a través de unos orificios grabados con láser sobre la alúmina y sobre los que se ha depositado una capa de Au. En el mismo paso de formación de estos orificios se crean los orificios para la entrada y salida del fluido.

La cavidad de bombeo: Es la cavidad por la que pasará el fluido y donde se provocarán las variaciones de presión, por la deflexión de la membrana, para forzar el flujo del fluido. Las variaciones de presión, junto al funcionamiento de las válvulas pasivas, harán que el fluido pase en la dirección indicada en el esquema de la figura 1. Por la parte inferior se dispone un sustrato de silicio con una serie de sensores (de temperatura, presión y químicos) para controlar el funcionamiento del dispositivo y del microdispositivo. La unión de estos dos sustratos de silicio se realiza, al igual que para la cavidad de actuación, mediante resina epóxica. Por supuesto, esta unión también ha de ser perfectamente hermética para evitar fugas de fluido (Carmona, 2000).

La figura 2 muestra la membrana termoneumática, montada sobre un soporte de goma y luego sobre uno de aluminio para facilitar su manipulación experimental, propuesta para ser utilizada en la cavidad de bombeo de la microbomba. La figura 3 presenta las imágenes superior, alúmina, e inferior, silicio, de la membrana de la figura 2.

El proceso de fabricación de las membranas se llevó a cabo en el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona (CNM), España. La estructura de prueba tiene un

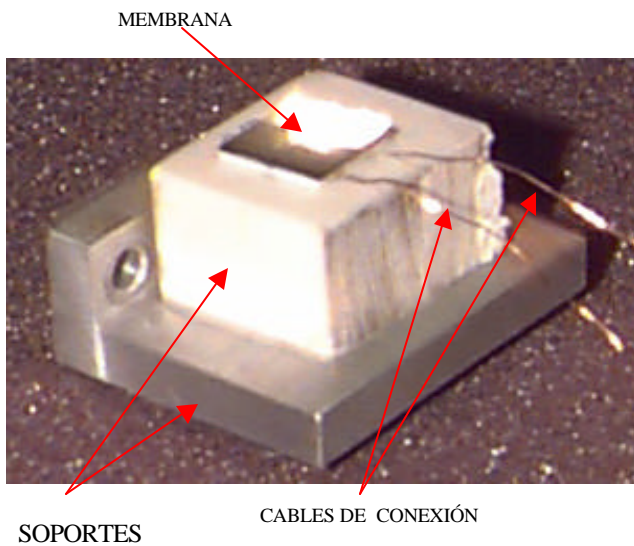


Figura 2. Membrana termoneumática.

área de $4000 \mu\text{m}^2$, $14 \mu\text{m}$ de grosor y una cavidad de actuación con una profundidad de $300 \mu\text{m}$.

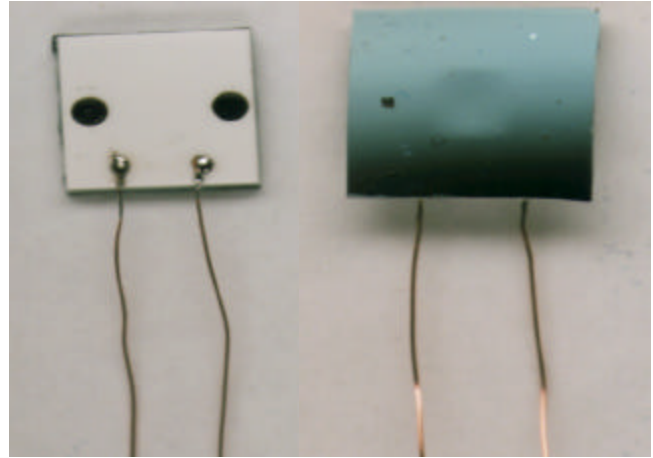


Figura 3. Vistas superior (alúmina) e inferior (silicio) de la cavidad de actuación, a derecha e izquierda respectivamente.

Interferometría Óptica

Entre las técnicas ópticas empleadas para la medida de desplazamientos micrométricos la más conocida es la interferometría láser, la cual suele emplearse en la medida de espesores y análisis de superficies. La interferometría proporciona precisiones por debajo de la longitud de onda del láser que se emplea, es decir, por debajo de $0.5 \mu\text{m}$ cuando se utilizan láseres dentro del espectro visible. No obstante, uno de los principales inconvenientes de las técnicas interferométricas es que proveen un valor indirecto del espesor o desplazamiento medido, ya que se deben contar el número de interferencias (máximos y mínimos) de la señal obtenida para determinar la distancia absoluta (Domingo *et al.*, 2000).

La interferometría óptica es un fenómeno basado en la naturaleza ondulatoria de la luz que permite realizar medidas precisas de las formas o de las distancias, ya que proporciona una resolución extraordinaria y no requiere un contacto físico directo con la superficie sometida a estudio. La expresión matemática que describe la perturbación óptica es una ecuación diferencial parcial homogénea de segundo orden y obedece al principio de superposición. La interferencia óptica se puede decir que es una interacción de dos o más ondas de luz que producen una intensidad resultante, la cual se desvía de la suma de las intensidades componentes.

El principio fundamental de la interferometría consiste en la interacción o interferencia entre dos ondas lumi-

nosas que se encuentran una con otra, de forma parecida a lo que sucede cuando se encuentran dos ondas superficiales en el agua. En cualquiera de estos casos, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, la interferencia es destructiva y las ondas se anulan. Cuando coinciden las dos crestas o los dos valles, las ondas se refuerzan mutuamente, la interferencia es constructiva y las ondas se suman. En la figura 4 se puede observar éste fenómeno.

Los interferómetros pueden dividirse en dos clases:

- Los basados en la división del frente de onda: En este caso se usan porciones del frente de onda primario bien sea directamente como fuentes para emitir ondas secundarias o conjuntamente con sistemas ópticos para producir fuentes virtuales de ondas secundarias. Luego se hace que se encuentren estas ondas secundarias para interferir. Como ejemplo de esto se pueden mencionar el biprisma de Fresnel, los espejos de Fresnel y el espejo de Lloyd.
- Los que se fundamentan en la división de la amplitud: En este caso la onda primaria se divide en dos segmentos los cuales viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir.

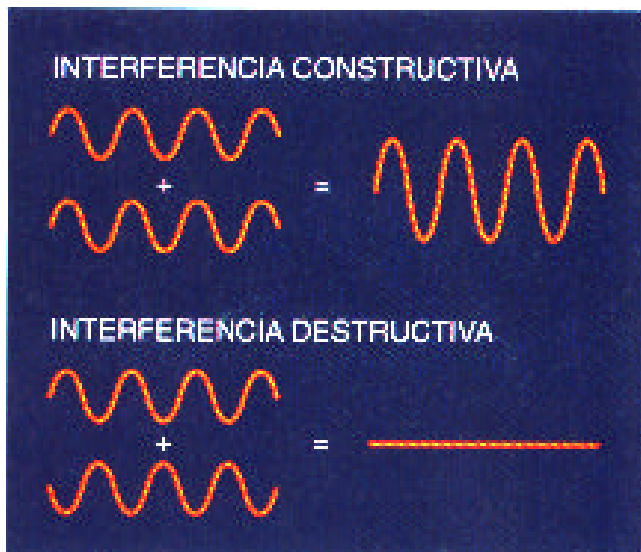


Figura 4. Principio de superposición. Cuando se presenta la interferencia las ondas se suman constructiva o destructivamente.

Dentro de la gran cantidad de interferómetros de división de amplitud el más conocido de todos, e históricamente el más importante, es el Interferómetro de Michelson. Su configuración se ilustra en la figura 5. Una fuente lu-

minosa (la cual puede ser un láser o una placa difusora de vidrio esmerilado iluminada por una lámpara de descarga) emite una onda, parte de la cual viaja hacia la derecha. El espejo semiplateado en el punto O divide la onda en dos, una parte viajando a la derecha y otra hacia arriba al fondo. Las dos ondas serán reflejadas por los espejos M1 y M2 y regresadas al divisor de haz. Parte de la onda que viene de M2 pasa a través del divisor de haz hacia abajo y parte de la onda proveniente de M1 es desviada por el divisor de haz hacia el detector. Por lo tanto, las ondas se unen y es posible que se produzca interferencia dependiendo del estado de coherencia temporal de la onda electromagnética que ilumina el interferómetro (**Hecht & Zajac, 1977**).

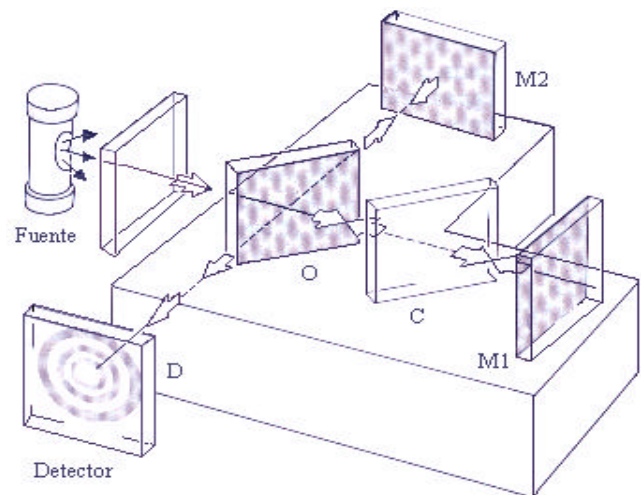


Figura 5. Interferómetro de Michelson.

Obsérvese que un haz pasa a través de O tres veces mientras que el otro pasa una sola vez. En consecuencia, cada haz cruzará igual espesor de vidrio únicamente cuando una placa compensadora, C, se introduzca en el brazo OM1. El compensador es un duplicado exacto del divisor de haz con la excepción de un posible plateado o recubrimiento por una película delgada sobre el divisor de haz. Este último se coloca a un ángulo de 45° tal que O y C sean paralelas una respecto a la otra. Con el compensador en su lugar cualquier diferencia de camino óptico aparece de la diferencia de camino real. Además, debido a la dispersión del divisor de haz, el camino óptico es una función de la longitud de onda, λ . Para un análisis cuantitativo, el interferómetro sin la placa compensadora puede ser usado con una fuente cuasi monocromática. La inclusión del compensador evita el efecto de dispersión, de tal modo que aún una fuente con ancho de banda gran-

de puede llegar a generar franjas observables (Hecht & Zajac, 1977).

La principal ventaja del Interferómetro de Michelson sobre las técnicas primitivas de producir interferencias es que los dos haces están ampliamente separados, pudiéndose variar la diferencia de recorrido ya sea moviendo uno de los espejos o introduciendo una sustancia refringente en la trayectoria de uno de los haces. Las técnicas interferométricas son ampliamente usadas por su gran resolución y para su ejecución se requiere de una radiación coherente temporalmente.

Arreglo Experimental

La figura 6 es un diagrama esquemático del experimento aquí planteado. Comparando este montaje con el interferómetro de Michelson, figura 5, se tiene que: la fuente es un láser de He-Ne, el detector es una cámara CCD, M1 es la membrana bajo prueba, M2 es el espejo y las lentes O y C forman el divisor de haz (Beam Splitter) (Duarte, 2001).

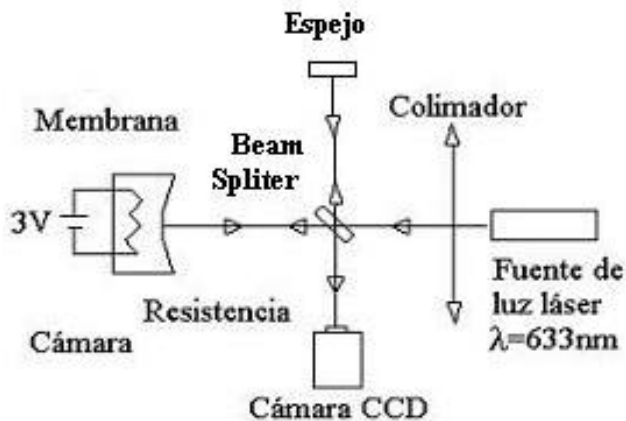


Figura 6. Diagrama esquemático del experimento.

Se aplicó una diferencia de potencial de 3V con una fuente de corriente continua. El montaje experimental se ubicó en una mesa antivibratoria, con colchón de aire, y en un cuarto totalmente aislado de vibraciones mecánicas, para evitar la influencia de ruidos medioambientales dada la gran sensibilidad del dispositivo experimental.

La iluminación se hace con una onda monocromática de un láser de He-Ne con una longitud de onda de $0.633\mu\text{m}$. Un divisor de haz produce los haces de referencia y de prueba. Este último haz incide perpendicularmente a la membrana. La deflexión de la membrana produce una di-

ferencia en el camino óptico, lo cual resulta en una diferencia de fase entre las ondas y se observan bordes oscuros y brillantes. Como se ilumina toda la superficie y cada punto de la membrana presenta una deflexión diferente, el resultado es una imagen bidimensional de interferencias que se pueden observar con una cámara CCD, como se muestra en el siguiente apartado. Estas imágenes se graban en una cinta de video para su posterior análisis.

Descripción matemática del experimento

En la figura 7, S , S_1 y S_2 son rendijas estrechas normales al plano del papel. Todo punto de S_1 y S_2 hace las veces de emisor de ondas esféricas secundarias que interfieren sobre el plano PP_0 . En este apartado se deducirá la ecuación que da la intensidad en cada punto P de la pantalla y el espaciamiento de las franjas de interferencia. En el punto P , coinciden 2 ondas que han efectuado recorridos diferentes S_2P y S_1P . Al superponerse tienen una diferencia de fase dada por

$$d = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}(S_2P - S_1P) \quad (1)$$

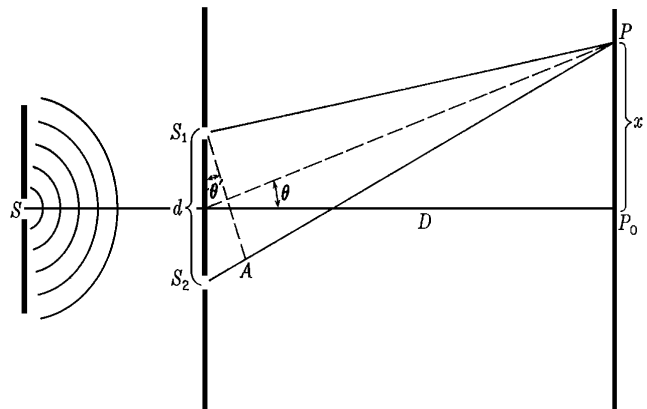


Figura 7. Diferencia de recorrido en el experimento de Young.

Se supone que al salir de S_1 y S_2 las dos ondas están en fase por equidistar ambas rendijas de S . Además, las amplitudes son prácticamente las mismas dado que S_1 y S_2 tienen la misma anchura y están muy próximas. El problema de hallar la intensidad resultante en P se reduce a sumar dos movimientos armónicos simples de igual frecuencia y amplitud pero diferente fase, o sea:

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2)$$

Si $a_1 = a_2$ y se tiene

$$I \approx A^2 = 2a^2(1 + \cos \delta) = 4a^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

Sí $\delta = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ la intensidad es igual a cuatro veces cada uno de los haces.

Sí $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ la intensidad es nula.

Para valores intermedios la intensidad varía entre estos límites de acuerdo con el cuadrado del coseno. En este formulismo, a representa la amplitud de las ondas individuales y A es la amplitud resultante. Ahora se calculará la diferencia de fase en función de la distancia $x = PP_0$, de la separación d entre ambas rendijas y de su distancia D a la pantalla. La diferencia de recorrido correspondiente es la distancia S_2A en la que se han dibujado la línea de trazos S_1A de modo que S_1 y A equidisten de P . En el montaje del experimento de Young, D suele ser varios miles de veces mayor que d o x . Por tanto, los ángulos θ y θ' son muy pequeños y prácticamente iguales. En estas condiciones puede considerarse que el triángulo S_1AS_2 es rectángulo y la diferencia de recorrido es $d \sin \theta'$. $d \sin \theta$. $\frac{x}{D}$. De este modo:

$$\Delta = d \sin \theta = d \frac{x}{D} \quad (3)$$

Llevando este resultado a la ecuación (1) se obtiene δ :

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{x}{D}$$

En este caso la ecuación (2) de la intensidad dará valores máximos, iguales a $4a^2$, siempre que δ sea un múltiplo entero de 2π , y de acuerdo con la ecuación (1), esto ocurrirá cuando la diferencia de recorrido sea un múltiplo entero de λ . Por lo tanto, tenemos:

$$\frac{x d}{D} = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots = m\lambda$$

o sea:

$$x = m\lambda \frac{D}{d} \text{ franjas brillantes} \quad (4)$$

El valor mínimo de la intensidad es cero, y ocurre cuando $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ Para estos puntos:

$$\frac{x d}{D} = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

o sea,

$$x = (m + \frac{1}{2})\lambda \frac{D}{d} \text{ franjas oscuras} \quad (5)$$

El número entero m , que caracteriza una franja brillante particular, se llama *orden de interferencia*. Por lo tanto, las franjas con $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ se denominan ordenes cero, primero, segundo, tercero, etc.

De acuerdo con estas ecuaciones, la distancia sobre la pantalla entre dos franjas sucesivas que se obtienen sustituyendo m por la unidad en las ecuaciones (4) y (5), es constante e igual a $\lambda D/d$.

Franjas circulares

Aparecen cuando se utiliza luz monocromática y los espejos están exactamente ajustados, siendo las que se emplean en la mayor parte de medidas con el interferómetro. Los máximos se producirán para aquellos ángulos θ que satisfagan la relación:

$$2d \cos \theta = m\lambda \quad (6)$$

donde d es la separación de los espejos (figura 8).

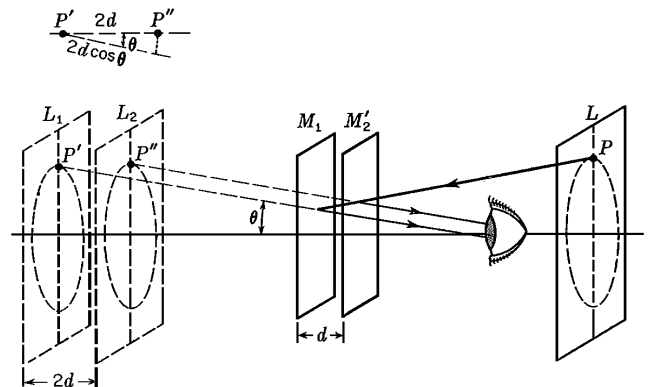


Figura 8. Formación de franjas circulares en el Interferómetro de Michelson.

Puesto que para m , λ y d dados, el ángulo θ es constante, los máximos se encontrarán sobre circunferencias cuyo centro es el pie de la perpendicular trazada desde el ojo a los espejos. La distribución de intensidad en los anillos se deduce de la ecuación (2), en la que la diferencia de fase está dada por la expresión:

$$d = \frac{2p}{l} 2d \cos q$$

La figura 9 muestra franjas circulares observadas en diferentes condiciones. Si la distancia entre M_1 y M'_2 es de unos pocos centímetros, el sistema de franjas es del tipo (a), como con los anillos muy apretados. Acercando lentamente M_1 hacia M'_2 , de modo que d disminuya, un anillo determinado, caracterizado por un valor dado de su orden m , disminuirá de radio, ya que, según la ecuación (6), el producto $2d \cos \theta$ ha de permanecer constante. Por lo tanto, cada vez que $2d$ decrece en λ , o sea d en $\lambda/2$, desaparecerá un anillo en el centro. Ello es consecuencia de que en el centro $\cos \theta = 1$, por lo que la ecuación (6) se convierte en

$$2d = m\lambda \quad (7)$$

Al variar m en una unidad, d varía en $\lambda/2$. Ahora bien: al aproximarse M_1 a M'_2 (figura 9) los anillos van espaciándose cada vez más, como se ve en (b), hasta alcanzarse una posición crítica para la cual la franja central cubre todo el campo, como en (c). Esto ocurre cuando M_1 y M'_2 coinciden exactamente, pues es evidente que en estas condiciones la diferencia de recorrido es nula para todos los ángulos de incidencia. Si seguimos desplazando M_1 en la misma dirección, sobrepasa a M'_2 y vuelven a aparecer nuevas franjas ampliamente espaciadas que se originan en el centro. Al aumentar la diferencia de recorrido estos anillos se irán apretando gradualmente, como puede verse en (d) y (e).

Contando el número de franjas de luz monocromática que pasan por el centro del campo visual al desplazar lentamente el espejo M_1 se tendrá una medida de este desplazamiento en función de la longitud de onda, para la posición d_1 , correspondiente a la franja brillante de orden m_1 , es

$$2d_1 = m_1\lambda$$

y para la d_2 , que da la franja brillante de orden m_2 ,

$$2d_2 = m_2\lambda$$

Restando estas dos ecuaciones:

$$d_1 - d_2 = (m_1 - m_2) \frac{\lambda}{2}$$

por tanto, el desplazamiento de M_1 es igual al número de franjas multiplicado por la semilongitud de onda. Naturalmente, no es necesario que la distancia corresponda a un número entero de semilongitudes de onda. Es fácil apreciar fracciones de desplazamiento de una décima de franja, y con habilidad hasta de un cincuentavo. En este caso, la medida tendría una exactitud de $\lambda/100$ ó 5×10^{-7} cm utilizando luz verde.

Resultados

Para la medida del desplazamiento se utilizaron unidades de actuación constituidas por el substrato de Si (con la membrana), la alúmina y la resistencia calefactora incluyendo los contactos eléctricos externos. Una vez realizado el montaje descrito en el apartado anterior, fue posible observar los anillos de interferencia mostrados en la figura 10.

Los anillos aparecen desde el centro debido a que allí se tiene la mayor deflexión del dispositivo en cada ins-

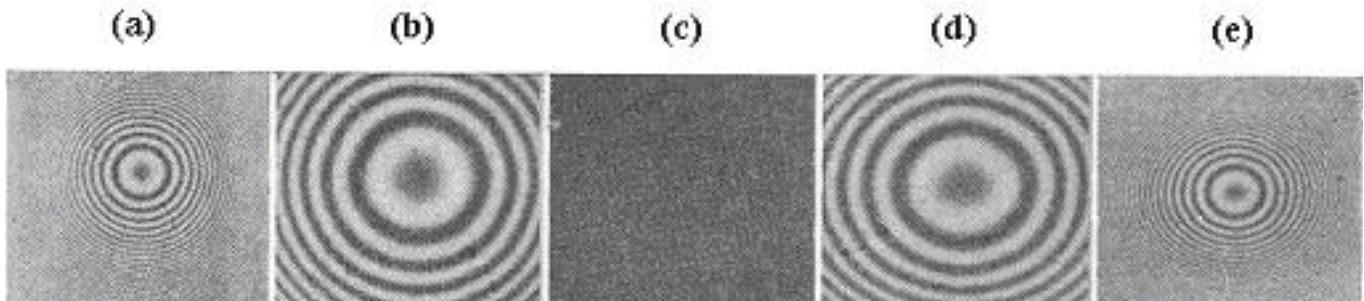


Figura 9. Diversos tipos de franjas observados con el Interferómetro de Michelson. Franjas circulares. La diferencia de recorrido aumenta en ambos sentidos a partir del centro. (Jenkins & White, 1976).

tante de tiempo. La distancia entre dos franjas consecutivas corresponde a $\lambda/2 = 0.316 \mu\text{m}$; de esta manera se obtiene una precisión del orden de las micras.

Con la ayuda de un sistema TV-Vídeo fue posible contar los anillos y medir su tiempo de formación. La figura 11 muestra la interpretación de datos numéricos de la deflexión de la membrana obtenida de la imagen de interferencia (secuencia de anillos). En los primeros cinco minutos la formación de anillos ocurrió de dentro hacia fuera obteniéndose la curva con pendiente positiva. Inmediatamente después de apagar la fuente de alimentación, la formación de anillos fue desde afuera hacia adentro y se obtuvo la curva con pendiente negativa como consecuencia del descenso en la temperatura dentro de la cavidad de actuación. El pico observado posterior a los cinco minutos (320 segundos) corresponde al máximo valor de deflexión de la membrana e identifica su tiempo de respuesta; esto significa que para lograr la máxima deflexión de la membrana se deberá aplicar la señal de excitación durante un tiempo mínimo de 320 segundos. De la figura 11 se puede extraer información sobre la deformación de la membrana; en este caso, para una membrana de $14 \mu\text{m}$ de grosor, y habiendo aplicado la señal de alimentación a la resistencia calefactora durante 320 segundos, se obtiene una deflexión máxima de $53 \mu\text{m}$.

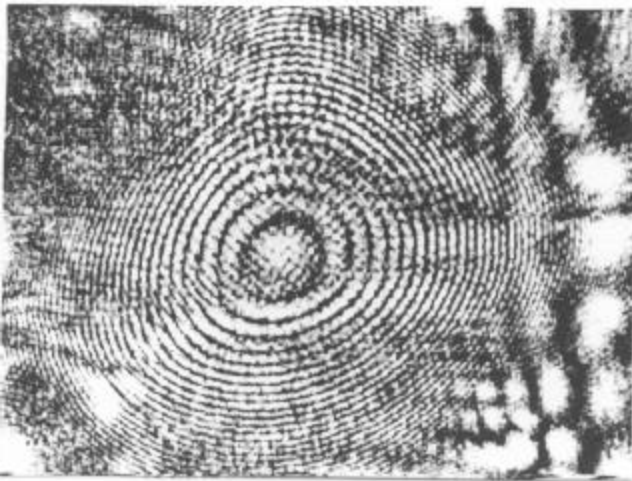


Figura 10. Imagen interferométrica de la deflexión.

Con esta técnica es posible realizar una caracterización precisa del comportamiento dinámico de una membrana; para ello bastará con aplicar una señal cuadrada, con la frecuencia de operación deseada, a la resistencia calefactora en la cavidad de actuación. Igualmente, con el interferómetro de Michelson es posible variar la distancia

entre la membrana y la fuente luminosa para establecer la influencia que dicha variación ejerce sobre la deflexión de la membrana.

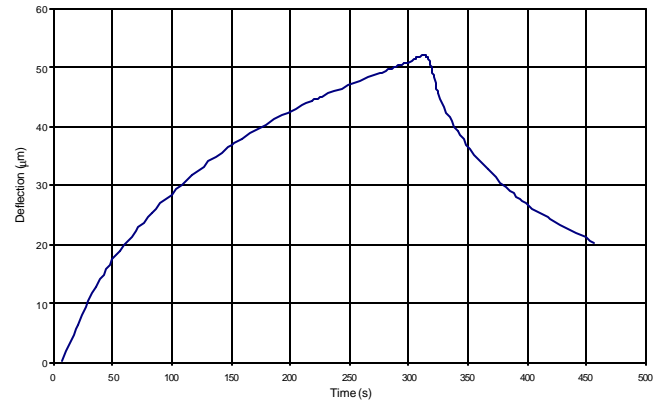


Figura 11. Evolución temporal de la deflexión de una membrana de $14 \mu\text{m}$.

Conclusiones

En el presente trabajo se ha descrito un diseño experimental, basado en el interferómetro de Michelson, para la medida de la distribución de desplazamientos en una membrana termoneumática. Esta membrana se construyó mediante ataque anisotrópico de una oblea de silicio, el cual permite configurar la cavidad de actuación.

Cuando se compara con otras técnicas de medición de pequeños desplazamientos, el interferómetro de Michelson presenta las siguientes ventajas: ofrece resoluciones del orden de las micras, cercanas a la longitud de onda de la fuente luminosa empleada; como resultado del análisis de los anillos de interferencia se puede obtener la respuesta dinámica del dispositivo bajo estudio; permite efectuar estudios de superficies en 3-D y es automatizable.

Como desventajas se tiene que las superficies bajo estudio deben estar muy limpias, el banco óptico debe estar totalmente alejado de cualquier posible ruido o vibración mecánica ya que es muy sensible a este tipo de interferencias, y proporciona medidas indirectas (conteo de anillos).

Por último se puede afirmar que el método aquí planteado, es fácilmente adaptable a la caracterización de dispositivos, con dimensiones reducidas, que presenten como principio de funcionamiento la variación de su geometría.

Bibliografía

- Carmona M.**, 2000. Modelización y test de micromembranas: Aplicación a componentes de microfluídica. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Domingo J., Duarte J. E., Moreno M., Puig M. y Samitier J.**, 2000. Caracterización automática de pequeños actuadores por láser. Memorias del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación SAAEI'00, Septiembre 13 a 15 de 2000, Terrasa, Cataluña, España, 253-256.
- Duarte J. E.**, 2001. Diseño y Test de Micromembranas Actuadas Ópticamente. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Duarte J. E., Fernández F. y Moreno M.**, 2005. Caracterización de microactuadores mediante técnicas ópticas. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Año 15, No. 59. 35-38.
- Hecht E. y Zajac A.**, 1977. Óptica. Fondo Educativo Interamericano, S.A., Madrid.
- Jenkins F. A. and White H. E.**, 1976. Fundamentals of Optics. McGraw-Hill, New York.
- Ruiz O., Samitier J., Wenk B., Riethmuller W. and Ramos Martos J.**, 1996. Pendulum type accelerometers based on thick polysilicon surface micromachining. ESSDERC'96 Editions Frontiers, 725-728.
- Tabib-Azar M.** 1995. Sensing means and sensor shells: a new method of comparative study of piezoelectric, piezoresistive, electrostatic, magnetic, and optical sensors. Sensors and Actuators A **48**: 87-100.
- Yamashita K.**, 1998. Miniaturized infrared sensor using silicon diaphragm based on Golay cell. Sensor and Actuators A **66**: 29-32.

Recibido el 15 de junio de 2006

Aceptado para su publicación el 23 de marzo de 2007