

- nals with EEG arrays», *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, núm. 12, pp. 2113-2122, 2004.
- D. Gutiérrez, «Designing a spatial filter to improve SNR in two-class discrimination problems for BCI applications», en *Proceedings of the 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, 2008, pp. 372-377.
- D. Garrett, D. A. Peterson, C. W. Anderson y M. H. Thaut, «Comparison of linear, nonlinear, and feature selection methods for EEG signal classification», *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 11, núm. 2, pp. 141-144, junio 2003.
- D. Gutiérrez, F. García-Nocetti, y J. Solano-González, «Classification of multichannel EEG data using length/energy transforms», en *Proceedings of 2005 First IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing*, pp. 221-224, Puerto Vallarta, 2005.
- A. Kübler, B. Kotchoubey, J. Kaiser, J. Wolpaw, N. Birbaumer, «Brain-computer communication: Unlocking the locked in», *Psychological Bulletin*, vol. 127, pp.358-375, 2001.
- D. Gutiérrez, «Using EEG/MEG Data of Cognitive Processes in Brain-Computer», en *Proceedings of the Tenth Mexican Symposium on Medical Physics*, México, marzo 2008, pp. 31-36.

Diseño de micro y macro espejos de actuación electrostática

Raúl Campos-Rodríguez, Mildreth Alcaraz-Mejía

Departamento de Ciencias Tecnológicas, Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara, Av. Universidad 1115, Col. Lindavista, Ocotlán, Jalisco, 47820, México. Correo electrónico: rr_campos@hotmail.com; mildrethiam@hotmail.com

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño de micro y macro espejos de actuación electrostática. Debido a la complejidad de los fenómenos que intervienen en el dispositivo, en este capítulo se presta especial atención al diseño de los actuadores electrostáticos tanto micro como macroscópicos, y se deja como trabajo futuro el análisis de las propiedades ópticas de los dispositivos aquí descritos. Las dimensiones del microespejo se encuentran en el rango de los micrómetros, mientras que las del macroespejo se encuentran en el rango de los milímetros. Existe un factor de escalamiento de 1:250 entre las dimensiones de los espejos que se espera incida en este mismo orden de magnitud en los fenómenos electromecánicos en la micro y macro escala. Se detalla el diseño electro-mecánico y se explica su principio de funcionamiento. Se proporcionan modelos matemáticos y simulaciones numéricas que predicen el comportamiento de los principales elementos electromecánicos de los espejos. Se discuten las implicaciones en el mecanismo de actuación como resultado del escalamiento en las dimensiones. *Palabras clave:* Microsistemas, espejos, fuerza electrostática, MEMS, micro actuador electrostático.

Introducción

El término *Microsistema* o *MEMS* (Microelectromechanical Systems) por sus siglas en inglés, describe a un conjunto de dispositivos microscópicos capaces de realizar actividades útiles en entornos específicos [1, 2, 3, 4, 5]. El término *tecnología MEMS* se utiliza para describir el conjunto de técnicas, métodos y procesos para la fabricación de estos dispositivos [6, 7, 8]. Así, la tecnología MEMS o tecnología de los microsistemas se refiere a la ciencia o arte de miniaturizar los sistemas, en varios órdenes de magnitud, a fin de mantener al mínimo variables de operación como el volumen, peso y consumo de energía de los dispositivos. La minimización de estas variables de operación no es la única razón para miniaturizar los sistemas. De hecho, la conceptualización de sistemas de mínimas dimensiones ofrece la posibilidad de nuevas aplicaciones que resultan imposibles mediante técnicas de fabricación tradicionales [9, 10, 11, 12].

A fin de que la creación de microsistemas sea posible, es necesario utilizar técnicas novedosas para la construcción de microestructuras, la mayoría de ellas adoptadas de la fabricación de circuitos integrados [14]. Por ejemplo, los procesos de micromaquinado de superficie basados en fotolitografía permiten con toda facilidad la creación de engranes de involuta con un diámetro base de 80 micrómetros [13]. Esto es imposible de realizar mediante técnicas de fabricación basadas en tornos convencionales.

Este trabajo es una extensión del trabajo presentado por el primer autor en *Proceedings of the TexMEMS-VIII International Workshop*. Se presenta el diseño de micro y macro espejos de actuación electrostática con dimensiones en los micrómetros y milímetros, respectivamente. Existe un factor de escalamiento de 1:250 entre las dimensiones de ambos dispositivos. La finalidad de realizar dos prototipos con este factor de es-

calamiento es estudiar el efecto que produce el cambio de dimensiones en la fuerza electrostática que se genera entre las placas paralelas, los electrodos de actuación y de torsión de la superficie que soporta el espejo. El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 presenta los fundamentos de la fuerza electrostática. La sección 3 muestra los principales parámetros de diseño del actuador electrostático, mientras que la sección 4 presenta los prototipos de micro y macro espejos diseñados. La sección 5 muestra la estimación de algunos parámetros de operación de los prototipos mediante simulación de elemento finito. Finalmente la sección 6 presenta el modelo de experimentación y resultados obtenidos hasta el momento. Al final del trabajo se proporcionan conclusiones y referencias bibliográficas.

Actuador electrostático

En la figura 1 se muestra un arreglo de electrodos de placas paralelas. Al electrodo superior se le conoce como *electrodo de actuación*, y al inferior se le denomina *electrodo de polarización*. En esta configuración, el electrodo de polarización se encuentra anclado a una superficie de trabajo, mientras que el electrodo de actuación está libre en uno de sus extremos. Al aplicar un voltaje de signos contrarios a las placas se genera una fuerza de atracción [15], que se puede calcular como:

$$F_e = 1/2 (\epsilon_0 AV^2)/d^2 \quad (2.1)$$

Donde ϵ_0 es la permisividad del espacio libre, A es el área efectiva del capacitor que forman los electrodos, v es el voltaje aplicado a las placas y d su separación inicial.

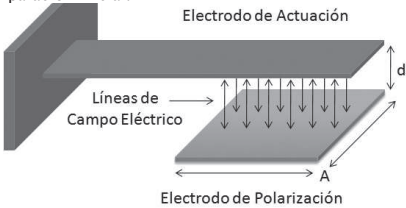


Figura 1. Arreglo de electrodos para actuación electrostática

El electrodo de polarización no experimenta movimiento ya que se encuentra anclado a la superficie de trabajo. Sin embargo, el electrodo de actuación experimenta un doblamiento debido a su extremo libre. Es natural concluir que el doblamiento es mayor en el extremo libre y se reduce conforme se acerca a su extremo fijo. Esto es debido a un efecto de palanca y a la dureza mecánica del material de fabricación del electrodo de actuación, que se opone al movimiento. La ecuación (2.1) entonces proporciona información en estado estacionario, cuando la separación entre placas es constante. Una mayor información se obtiene cuando se considera la fuerza mecánica que se opone al movimiento, la cual está determinada por la constante del resorte del electrodo de actuación. Según la Ley de Hook, un resorte lineal se comporta de la siguiente forma:

$$F = kz \quad (2.2)$$

Donde F es la fuerza que experimenta el resorte, k es la rigidez y z el desplazamiento del resorte. Puesto que esta fuerza se opone al movimiento del resorte, en equilibrio, las ecuaciones 2.1 y 2.2 deben ser iguales, esto es:

$$1/2 (\epsilon_0 AV^2)/d^2 = kz \quad (2.3)$$

Ahora bien, la separación entre placas d , se relaciona con el desplazamiento z del resorte mediante la siguiente ecuación:

$$d = d_0 - z \quad (2.4)$$

Es decir, en todo momento, la separación entre placas es igual a la separación original menos la elongación del resorte. Sustituyendo 2.4 en 2.3 resulta:

$$1/2 (\epsilon_0 AV^2)/d^2 = k(d_0 - d) \quad (2.5)$$

Se deduce inmediatamente que 2.5 es una ecuación cúbica en la separación entre placas d . De hecho, despejando y arreglando términos resulta:

$$d = d_0 - (\epsilon_0 AV^2)/(2kd^2) \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 presenta tres soluciones. Más aún, se concluye que existe una retroalimentación positiva en el sistema debida al cambio en la separación

de los electrodos. Es decir, al aplicar un voltaje, la separación entre las placas disminuye. A su vez, esta disminución incrementa la fuerza debido al término d^2 en el denominador de 2.6. La retroalimentación se presenta de manera infinita hasta que se alcanza un punto de equilibrio en el sistema. Sin embargo, no todos los puntos de equilibrio de 2.6 son estables. De hecho, un estudio de las fuerzas que intervienen en el sistema revela que existe una separación entre los electrodos, denominada d_{in} , en la cual la fuerza del resorte ya no puede compensar la fuerza electrostática. Para determinar esto, se parte del hecho de que 2.5 representa la fuerza total del sistema, llamada F_{tot} . Bajo esta convención, entonces se tiene que:

$$F_{tot} = k(d_0 - d) - 1/2 (\epsilon_0 AV^2)/d^2 \quad (2.7)$$

En equilibrio, F_{tot} debe ser igual a cero. Entonces, el problema se reduce a determinar el comportamiento de F_{tot} para pequeñas perturbaciones en la separación de las placas. Esto se logra haciendo que una variación de la separación $d + \delta d$ aplique a la fuerza total del sistema, esto es:

$$\delta F_{tot} = (\partial F_{tot})/\partial g|_V \delta g \quad (2.8)$$

Entonces, si en los puntos de equilibrio ∂F_{tot} es negativa para variaciones positivas de δg , el sistema es estable. En caso contrario, el sistema es inestable. Esto se puede verificar a partir del campo de dirección de 2.8. Para encontrar ∂F_{tot} se calcula la derivada de 2.7 respecto a la separación entre placas manteniendo el voltaje constante, es decir:

$$\delta F_{tot} = (\epsilon_0 AV^2/d^3 - k)\delta g \quad (2.9)$$

Para que el sistema total se encuentre en un equilibrio estable, la ecuación 2.9 debe ser negativa, lo que implica que:

$$k > \epsilon_0 AV^2/d^3 \quad (2.10)$$

Es decir, la ecuación 2.10 establece que la dureza del resorte no se debe ver sobrepasada por la fuerza electrostática. De acuerdo a 2.9 y 2.10 existen tres po-

siciones entre placas que resultan en un equilibrio del sistema. Sin embargo, es conocido que $d_{pi} = 2d_0/3$ es un punto de equilibrio inestable. El voltaje para llegar a este punto de equilibrio inestable es [7]:

$$V_{pi} = \sqrt{(8kd_0^3/27\epsilon_0 A)} \quad (2.11)$$

Parámetros de diseño

Las ecuaciones 2.1 a 2.11 proporcionan una idea general del comportamiento del actuador electrostático en un estado estacionario, es decir, una vez que ha llegado a un punto de equilibrio. No proporcionan gran información acerca del comportamiento transitorio del dispositivo desde su posición en reposo hasta llegar a su punto de operación. Un estudio profundo de los fenómenos transitorios presentes en el diseño del actuador electrostático queda fuera del alcance de este trabajo y se dejará para estudios posteriores. Sin embargo, a partir de las ecuaciones estáticas se puede obtener información importante para el diseño del actuador.

Área de actuación

Los electrodos de actuación y polarización forman un capacitor de placas paralelas. De acuerdo a la ecuación 2.1, la fuerza electrostática entre ambos electrodos es directamente proporcional al cuadrado del voltaje aplicado entre las placas e inversamente proporcional al cuadrado de su separación. A fin de controlar la cantidad de fuerza electrostática desde el diseño, se pueden considerar los parámetros del área y la separación entre placas. Sin embargo, en procesos de micro-maquinado superficial, como PolyMUMPs [16], la separación entre las capas de los diferentes materiales es fija, lo que limita a una sola separación entre placas al momento del diseño de los electrodos. Esto reduce a manejar el área como la única variable a tomar en cuenta durante la etapa de diseño de los espejos. El otro parámetro que se puede variar para controlar la fuerza electrostática es el voltaje, sin embargo, este es preferible dejarlo como un parámetro de control externo más que un elemento de diseño. En la figura 2 se muestra un diagrama de diseño para el

área de actuación, en la cual se pueden determinar el ancho y largo de los electrodos.

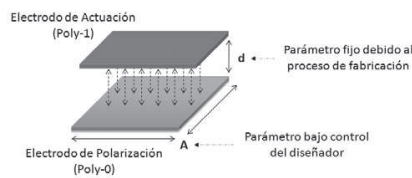


Figura 2. Parámetros de diseño del área de actuación

Constante del resorte

La constante del resorte es otro parámetro importante para el diseño del espejo. Aparece en las ecuaciones 2.2 a 2.11 y determina en gran medida el comportamiento mecánico del espejo. Un resorte muy suave permite utilizar voltajes bajos para lograr el movimiento de la estructura. Sin embargo, también significa una estructura mecánicamente inestable, con baja frecuencia de resonancia, lo cual resulta inadecuado para un dispositivo que se pretende que trabaje reflejando la luz. En el diseño propuesto, el resorte es de torsión y su dureza depende de las propiedades físicas del material así como de parámetros geométricos y de los momentos de inercia [7, 8, 9]. Los parámetros geométricos como ancho y largo de las estructuras están bajo control total del diseñador, con lo que se pueden obtener resortes con prácticamente cualquier constante de rigidez. En el proceso de fabricación PolyMUMPs [16], el patrón geométrico mínimo es aquel que tenga por lo menos una micra por lado, ofreciendo gran flexibilidad en el diseño. Solo el espesor de los materiales de fabricación es fijo, quedando fuera del control del diseñador. En la figura 3 se muestra un diagrama con los parámetros importantes que determinan la constante del resorte. Mediante fórmulas analíticas para el cálculo del momento de inercia de una viga con sección rectangular es posible estimar este parámetro. En este caso, la dureza del resorte se mide en newtons por grado o newtons por radian, según la convención que se desee utilizar.

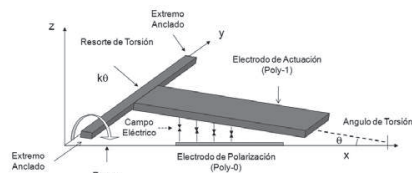


Figura 3. Parámetros de diseño del resorte de torsión

Diseño de prototipos

Como se ha mencionado en la sección anterior, una estructura tipo trampolín, anclada en ambos extremos, permite aprovechar la fuerza electrostática para generar movimiento. En la figura 4 se muestra un diagrama de diseño del macrospejo. El arreglo de las placas en la forma mostrada permite generar una torsión del trampolín. La barra central sirve de soporte a la estructura, al mantener suspendida a una gran placa sobre un par de electrodos de actuación. Los electrodos están colocados de manera simétrica como se ilustra. Esta gran placa es también el electrodo de actuación, ya que forma un par de capacitores de placas paralelas con los electrodos.

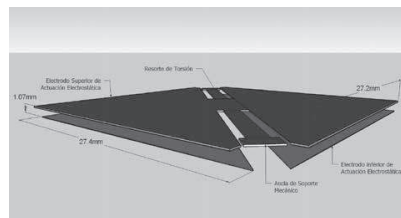


Figura 4. Esquema de diseño mecánico del actuador.

Al polarizar la placa superior con signo positivo y alguno de los electrodos en la parte inferior con signo negativo, se forman líneas de campo eléctrico que tratan de juntar ambas placas. Esto produce una torsión de la placa superior hacia el electrodo de polarización cargado con signo negativo. Si se elimina el campo eléctrico, la fuerza desaparece y la estructura vuelve a su posición original por la acción de la barra central. Si se alterna la polarización en los electrodos

inferiores, entonces se puede lograr un movimiento de vaivén de la estructura. Este movimiento oscilatorio puede utilizarse para desviar una luz láser, y de esta manera realizar un barrido en una superficie de interés.

Fabricación del microespejo

Las dimensiones de este prototipo están en el rango de los micrómetros ($1 \mu m = 1E^{-6}m$). Para su construcción se empleó un proceso comercial de micromaquinado superficial de polisilicio conocido como PolyMUMPs [16]. El proceso ofrece tres capas de silicio policristalino superficial las cuales pueden ser grabadas, mediante técnicas de fotolitografía, con patrones geométricos para formar estructuras microscópicas con capacidad de movimiento. En la figura 5 se muestra un corte transversal del proceso PolyMUMPs. La fabricación inicia sobre un sustrato tipo-n. Sobre este sustrato se deposita una película de nitruro, una capa que sirve de material aislante mecánico, térmico y eléctrico. Sobre el nitruro se deposita la primera capa de polisilicio conocida como poly0, con un espesor de 0.5um. Esta capa se encuentra anclada al nitruro, y generalmente se utiliza para diseñar conexiones eléctricas y electrodos de polarización. Sobre poly0 se deposita una capa de óxido de sacrificio de 2.0 um, conocida como oxide1. Mediante un proceso similar, se deposita poly1 y oxide2, cuyos espesores son 2.0 um y 0.75 um, respectivamente. Sobre oxide2 se deposita una capa de polisilicio de 1.5 um de espesor conocida como poly2. De esta manera, las capas poly0 y poly1 se encuentran separadas 2.0 um, por Oxide1, mientras que poly1 y poly2 solo 750 nm por oxide2. Finalmente, se deposita una capa de oro de 0.75 um de espesor conocida como metal. Debido a sus propiedades eléctricas y ópticas, esta capa se utiliza para construir conexiones eléctricas y como superficie reflejante de la luz. Al final del proceso, las capas de sacrificio oxide1 y oxide2 son removidas mediante la acción de un ácido para liberar mecánicamente a las capas poly1 y poly2.

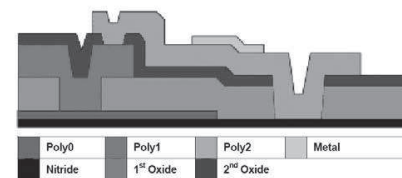


Figura 5. Proceso de fabricación PolyMUMPs

Los patrones geométricos empleados en la construcción de un microsistema, como vigas voladas, placas paralelas, etcétera, se trazan utilizando una herramienta CAD muy similar a la empleada en el diseño de semiconductores. El resultado, es un conjunto de celdas en formato CIF que son utilizadas para generar las máscaras de litografía para el proceso de fabricación [17]. El diseño final del microespejo se muestra en la figura 6a), el cual incluye áreas de contacto eléctrico a los lados del diseño para realizar las pruebas. En la figura 6b) se muestra uno de los prototipos fabricados. Se utilizaron las capas poly0 y poly1 para crear los electrodos de polarización y la placa suspendida de actuación, respectivamente. Finalmente, se utilizó la capa metal, en este caso oro de 750 nm de espesor, sobre una capa de poly2 para formar el rectángulo central que hace las veces de superficie reflejante para la luz. Además, el diseño incluye otro mecanismo de actuación basado en expansión térmica, el cual está realizado en las capas poly1 y poly2, unidas mediante un ancla rectangular grabada en la capa poly1-poly2-via. Este mecanismo de actuación está dispuesto en forma ortogonal respecto al primero, lo que permite dos grados de libertad en el espejo. Sin embargo, dicho mecanismo de actuación no forma parte de esta primera parte del trabajo de investigación y se abordará en futuras extensiones.

El electrodo de polarización en poly0 es un triángulo isósceles con lados 80um y 113 um, respectivamente. El electrodo de actuación en poly1 está formado por dos triángulos isósceles contrapuestos, con esquinas truncadas y lados de 100 um y 140 um, respectivamente. Los triángulos se encuentran unidos por su parte central mediante un rectángulo de 30 um y 15um por lado. De la parte central de este rectán-

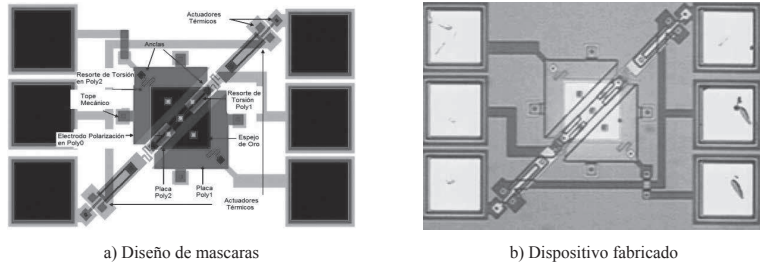


Figura 6. Prototipo de microespejo

gulo se extiende una viga que sirve de soporte para toda la estructura y que hace las veces de resorte de torsión. a los extremos de la placa en poly1 se agregaron topes mecánicos, mediante la capa Dimple, para evitar que la placa superior colapse sobre el electrodo de polarización en poly0 por la fuerza electrostática.

Fabricación del macroespejo

El macroespejo fue fabricado siguiendo la misma geometría mostrada en la figura 4, con dimensiones en el rango de los milímetros. Debido a que el factor de escalamiento entre los espejos es de 1:250, el espesor de la placa en poly1 de 2 um en el microespejo corresponde a una placa de espesor de 0.5 mm en el macroespejo. Este es un grosor típico de la hoja de aluminio que puede encontrarse con facilidad, por esta razón se decidió establecer dicho factor de escalamiento. Las dimensiones del triangulo isósceles que forman el electrodo de polarización del ma-

croespejo son 27.4 mm por lado. Se colocaron dos de ellos de manera simétrica sobre una superficie plástica. Las dimensiones del electrodo de actuación son de 27.2 mm por lado en cada uno de los dos triángulos truncados que lo conforman. La separación entre el electrodo de actuación y el de polarización es de 1.07 mm. Las piezas de aluminio que forman el macroespejo se muestran en la figura 7a). El prototipo ensamblado se presenta en la figura 7b). El material empleado en la construcción del prototipo es hoja de aluminio de 0.5 mm de espesor. Se emplearon tijeras normales para cortar las piezas. El prototipo fue colocado sobre una superficie plástica con una resistividad eléctrica de aproximadamente $1E^{13}\Omega m$, lo que proporciona un excelente aislamiento eléctrico. Este aislamiento eléctrico se requiere debido al alto voltaje empleado para polarizar las estructuras, que sobrepasa los 2500 V.

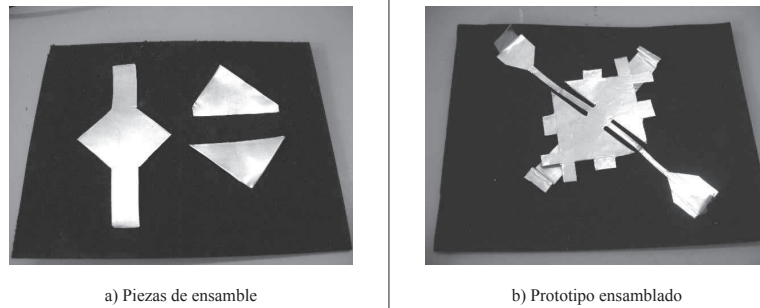


Figura 7. Prototipo de macroespejo

Estimación de parámetros

Los electrodos de polarización se encuentran fijos a una estructura aislante, mientras que el electrodo de actuación se encuentra suspendido mediante una barra delgada que funciona como un resorte de torsión. Consecuentemente, los parámetros mecánicos y eléctricos de las estructuras resultan de especial interés para este trabajo. Además, la respuesta en frecuencia de la estructura es muy importante si el diseño propuesto se pretende utilizar como un escáner. En este trabajo se inicia con el estudio de los parámetros mecánicos y eléctricos de las estructuras propuestas.

Constante del resorte

El resorte es una barra central que mantiene suspendido al electrodo de actuación. Las fórmulas analíticas para el cálculo de la constante del resorte de una viga de torsión son complicadas, sobre todo si se considera que dicha constante está distribuida en toda la estructura que mantiene a la placa suspendida. En este trabajo se utilizó la frecuencia natural del electrodo de actuación para encontrar su constante del resorte de manera indirecta. La técnica consiste en estimar la rigidez de la placa suspendida mediante un análisis modal. Se sabe que la frecuencia de resonancia de un sistema masa-resorte, sin considerar la fricción, está determinada por:

$$f_i = 1/2\pi \sqrt{(k_i / m)} \tag{5.1}$$

Donde k_i es la rigidez de la estructura cuando oscila con una frecuencia f_i en el i -ésimo modo de resonancia y m es la masa efectiva en movimiento de la estructura. De esta manera, si en 5.1 se conoce f_i y m , la constante k_i se determina como:

$$k_i = \omega^2 m \tag{5.2}$$

donde $\omega = 2\pi f_i$ es la frecuencia natural, en radianes, de la estructura.

A fin de determinar k_i a partir de 5.2, es necesario conocer la masa de la estructura y la frecuencia natural en la dirección en la que se desea estimar la rigidez del sistema. Para encontrar la masa de las estructuras, se utiliza la relación volumen/densidad de los mate-

riales empleados en su fabricación, ya que se conocen con gran precisión:

$$m = \rho V \tag{5.3}$$

donde ρ es la densidad del material en Kg/m^3 y el volumen en m^3 .

Para el caso del electrodo de actuación en el microespejo, cuyo material de fabricación es polisilicio con una densidad de $\rho_1 = 2330 Kg/m^3$ y un volumen $V_1 = 3.1274822E^{-16}m^3$, de (5.3) se encuentra que la masa es $m_1 = 7.2870336E^{-11} Kg$. Por otro lado, para el macroespejo, cuyo material de fabricación es aluminio con densidad de $\rho_2 = 2700Kg/m^3$ y un volumen $V_2 = 1.5259259E^{-11} m^3$, la masa resulta ser $m_2 = 4.12E^{-5} Kg$.

Para encontrar la frecuencia de resonancia, se utilizó la simulación de elemento finito mediante la técnica de análisis modal. Se generaron dos modelos sólidos con una relación de escalamiento de 1:250. Las condiciones de frontera para este experimento consistieron en restringir el movimiento en los extremos del resorte de torsión en sus caras laterales. En las simulaciones para ambos modelos, se utilizó un mallado de tamaño cinco empleando un elemento finito sólido 3D con 20-nodos y tres grados de libertad por nodo, que representan la traslación en los ejes X, Y, y Z. La figura 8 muestra un detalle del mallado empleado. Se utilizó el método block-lanzos para calcular los primeros cinco modos de resonancia de la estructura. Este método construye el espacio nulo de la matriz de rigidez definida por los elementos finitos del mallado y expande los resultados a toda la estructura. Los resultados para ambos modelos se muestran en la tabla 1. El primer modo de resonancia corresponde al movimiento de torsión en la dirección en la que se desea estimar la rigidez de la estructura. Con las frecuencias y los valores de las masas, mediante la ecuación 5.2, se encuentra que la constante del resorte para la microestructura es $k_1^1 = 0.9394$ y para la macro-estructura $k_1^2 = 0.292$. La forma en la que oscila la estructura en el primer modo de resonancia se muestra en la figura 9. La parte superior se mueve hacia dentro de la figura mientras que la parte inferior hacia afuera.

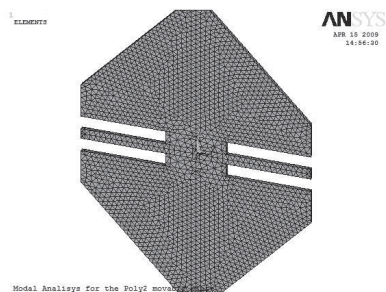


Figura 8. Detalle del mallado para análisis modal

Tabla 2. Frecuencias de resonancia mecánica

Modo	Macro-Modelo	Micro-Modelo
1	424.36Hz	180.71kHz
2	873.12Hz	357.12kHz
3	1327.20Hz	543.83kHz
4	1473.0Hz	600.85kHz
5	1886.20Hz	769.52kHz

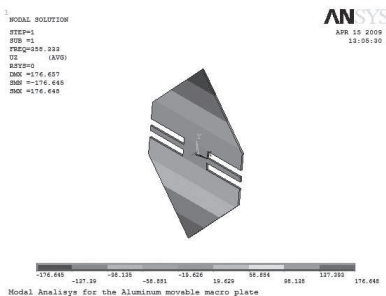


Figura 9. Oscilaciones en el primer modo de resonancia

El resto de los modos de resonancia en la tabla 1 pueden utilizarse para estimar la rigidez de las estructuras para diferentes direcciones de movimiento, para obtener una idea general del comportamiento dinámico de los espejos.

Campo eléctrico

Como se describe en la ecuación 2.1, la fuerza electrostática generada por un par de placas paralelas está relacionada con la densidad de campo eléctrico en el capacitor de núcleo de aire formado por los electrodos. Esta densidad de campo eléctrico se determina por la constante dieléctrica del aire, el área efectiva de polarización, el voltaje aplicado y la separación entre las placas.

Sin embargo, como es de esperarse, la acción de la fuerza electrostática provocará que el electrodo de actuación se doble hacia el electrodo de polarización, con lo que aun con un voltaje constante, la fuerza electrostática tenderá a ser una fracción mayor a medida que pasa el tiempo, debido a que la separación entre placas disminuirá. Por esta razón, se dice que el sistema esta retroalimentado, y la variable que se retroalimenta es la separación entre placas. Más aun, la distancia entre placas se volverá irregular, siendo menor en los extremos del electrodo de actuación y mayor en su centro. Este fenómeno transitorio ocurre durante unos milisegundos justo después de aplicar el voltaje de polarización.

A fin de analizar el fenómeno eléctrico presente en el dispositivo en estado estacionario, se utilizó un modelo tridimensional para su simulación en computadora mediante el método de elementos finitos. Debido a la simetría del fenómeno, se consideró la mitad del electrodo de actuación y uno de los electrodos de polarización dispuestos uno sobre otro y rodeados por una masa de aire. Se aplicó un voltaje de 0V al electrodo de polarización y 16V al de actuación. El resultado de la distribución del campo eléctrico se muestra en la figura 10. La mayor parte del campo eléctrico se encuentra concentrado entre los electrodos, lo cual resulta conveniente para el dispositivo ya que la totalidad de la fuerza generada se puede aprovechar para mover la estructura. También es posible apreciar que existen pequeñas fugas de campo eléctrico por los extremos de la estructura, sobre todo en las esquinas agudas. Se concluye que esto se puede minimizar redondeando las esquinas del diseño.

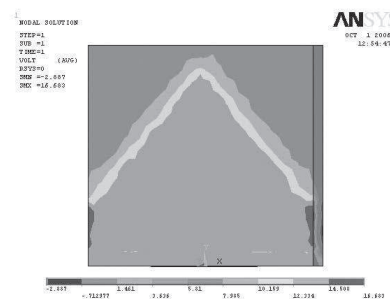


Figura 10. Distribución del campo eléctrico

Como resultado de la fuerza electrostática, el electrodo de actuación se doblará hacia el electrodo de polarización. Este es un fenómeno en el que ocurren dos dominios, el dominio eléctrico y el dominio mecánico. De hecho, como ya se ha mencionado, los cambios en un dominio afectan al otro y viceversa debido a la retroalimentación implícita del sistema. Se dice entonces que los fenómenos se encuentran acoplados. En la técnica de elementos finitos, dichos fenómenos son resueltos mediante análisis de múltiples dominios. En la simulación empleada en este trabajo, se consideró la deformación mecánica que sufre el electrodo de actuación por la fuerza electrostática en estado estacionario. Los resultados se muestran en la figura 11. Como es de esperarse, la máxima de-

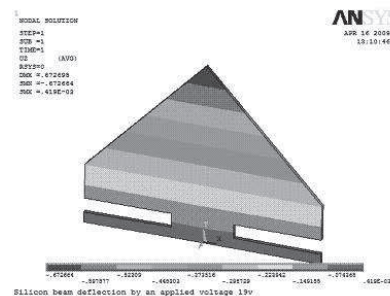


Figura 11. Deformación fuerza electrostática.

flexión de la estructura ocurre en la parte superior, debido al efecto de palanca. Para este caso en particular, la máxima deflexión lograda es de -672 nm, para una diferencia de potencial de 16 V entre las placas. El signo negativo indica que la deflexión fue en el sentido negativo del eje Z, debido a la forma en que el modelo tridimensional fue capturado en la herramienta de simulación.

Curva voltaje-desplazamiento

Se realizaron ocho simulaciones igualmente espaciadas en el rango de voltaje de 312.5V a 2500V para determinar el comportamiento del electrodo de actuación bajo la acción de diferentes voltajes. El comportamiento en simulación del extremo superior del electrodo de actuación se muestra en la curva de la figura 12. La deformación mecánica por la fuerza electrostática describe una curva cuadrática, centrada en el origen y con asíntota cerca de los 2700V, donde se alcanza el voltaje de colapso de la estructura del macroespejo. Esto corresponde al punto de equilibrio inestable del sistema, ubicado a dos tercios de la separación original de los electrodos, verificando el comportamiento cuadrático del campo eléctrico respecto del voltaje representado por la ecuación 2.1.

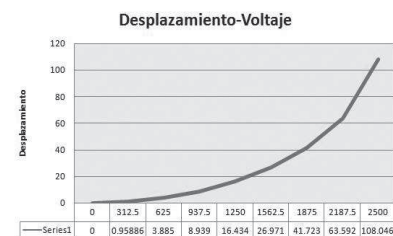


Figura 12. Curva desplazamiento-voltaje

Experimentación

Una vez fabricados los prototipos, se procedió a la realización de pruebas para verificar sus principales parámetros de funcionamiento. En esta etapa del trabajo, se realizó la experimentación necesaria para

verificar la constante del resorte del sistema y la deformación máxima alcanzada por el electrodo de actuación bajo la acción de un voltaje conocido, todo en estado estacionario. Para medir la constante del resorte, se empleó el esquema mostrado en la figura 13. La estructura se sometió a una fuerza conocida y se midió el ángulo de deformación. Se utilizó una luz láser para determinar el desplazamiento ΔL . El experimento se montó sobre un puente óptico perfectamente alineado. Para establecer el punto cero del experimento se alineó la luz láser sobre el centro de la estructura en reposo a partir del cual se midió el desplazamiento. En las siguientes secciones se detallan los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

Validación de la constante del resorte

Para verificar la rigidez del sistema se realizó un experimento que consistió en aplicar una fuerza conocida a un extremo del electrodo de actuación a fin de medir el máximo desplazamiento alcanzado por la estructura. Para esto, se utilizó un puente óptico Newport, perfectamente alineado como soporte mecánico para la prueba. Sobre éste se colocaron las estructuras bajo estudio. Además, se empleó una luz láser montada mediante un sistema de posicionamiento sobre el mismo puente óptico e incidiendo sobre el centro del electrodo de actuación. Como primer paso, se estableció un punto de referencia en ausencia de fuerza alguna sobre el electrodo de actuación. Después, se aplicaron varios pesos cuyo valor en gramos-fuerza se determinó con resolución de nanogramos. Enseguida, se midió el desplazamiento que sufrió la luz láser respecto del punto de referencia y mediante trigonometría se determinó el ángulo de torsión. El experimento se repitió con diferentes pesos en miligramos. Los pesos fueron determinados con cuatro dígitos decimales en el rango de los nanogramos, mediante una balanza digital Meter AE200 perfectamente calibrada. Una vez medidos, los pesos fueron etiquetados y clasificados.

En la figura 13 se muestra un diagrama conceptual del experimento y en la figura 14 se ilustra su implementación mediante el puente óptico con la luz

láser y el prototipo de experimentación. En la figura 15 se proporciona un gráfico con los valores encontrados experimentalmente. El valor más alto encontrado en esta experimentación es de 0.160 y el menor 0.145. El valor promedio oscila entre 0.155 y 0.150. Las unidades de este gráfico son N / grado debido a que la constante calculada es de un resorte de torsión. Este valor contrasta con el obtenido en simulación, que es de 0.292. La diferencia podría deberse a defectos en la fabricación de la macroestructura o errores en la realización de las medidas de la misma. Como trabajo futuro, se planea ampliar la altura h en el esquema de experimentación de la figura 13 para tener mayor precisión en la realización de los experimentos. Debe notarse que al aumentar el valor de h , la distancia ΔL , que se genera por la aplicación de un peso conocido se ve magnificada, permitiendo realizar las mediciones con mayor exactitud. En los experimentos reportados, se utilizó una distancia $h = 21.5\text{cm}$. Para futuros experimentos se planea utilizar una altura $h = 245\text{cm}$.

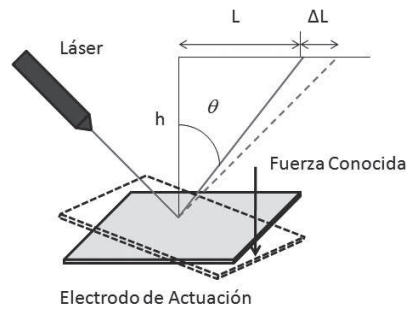


Figura 13. Verificación de constante del resorte

Validación de la fuerza electrostática

Para verificar la fuerza electrostática producida por una diferencia de potencial entre los electrodos del prototipo, se utilizó el generador de alto voltaje mostrado en la figura 16. Un oscilador excita el primario de un transformador de instrumentación TR1. A su vez, el secundario de dicho transformador excita el primario de un transformador tipo flyback TR2. El

flyback genera un voltaje continuo de varios miles de volts, dependiendo de la frecuencia de excitación del transformador de instrumentación. Las terminales de TR2 se conectan al electrodo de polarización y al electrodo de actuación. En experimentación, se ha logrado una torsión del electrodo de actuación cercana a los 5° . Para mantener el voltaje generado en un rango aceptable para las estructuras diseñadas, se mantiene la alimentación del primario de TR2 a no más de 24V. Aun así, se producen arcos de voltaje entre las secciones puntiagudas del diseño, lo que dificulta la realización de los experimentos. Debido a esto, se han propuesto modificaciones al diseño de los actuadores para reducir las secciones punzantes, y evitar en lo posible la generación de arcos de voltaje.

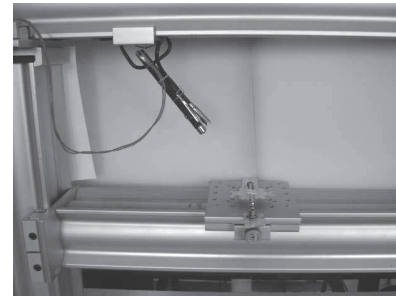


Figura 14. Experimento con láser en puente óptico

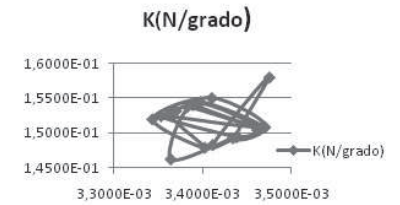


Figura 15. Valores experimentales de la constante del resorte

Para aplicar este marco de experimentación al micro espejo se deben vencer varios retos, todos ellos relacionados con el reducido tamaño del microdispositivo. Primero, es necesario colimar el haz de luz láser para tener un diámetro de 10um aproximadamente. Después, se debe contar con un mecanismo para posicionar el láser sobre la superficie reflejante del espejo que es de 80um por lado. Finalmente, es necesario medir el ángulo de deflexión del láser por el movimiento de la fuerza electrostática. Como base para la experimentación se cuenta con un interferómetro de luz blanca New-View 100 que además posee la capacidad de determinar mapas de perfiles de estructuras microscópicas. Se pretende utilizar este dispositivo para obtener varios perfiles antes y después de aplicar un voltaje de actuación y analizar las imágenes para

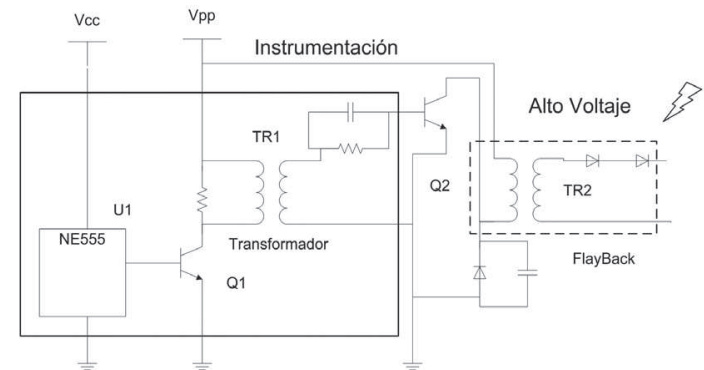


Figura 16. Generador de alto voltaje

determinar la deformación de la estructura. Esta etapa se encuentra actualmente en experimentación.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el diseño de espejos de actuación electrostática. Se han mostrado dos prototipos, uno cuyas dimensiones se encuentran en el rango de los micrómetros, fue fabricado mediante fotolitografía en un proceso comercial de micro-maquinado superficial de polisilicio. El otro, cuyas dimensiones se encuentran en el rango de los milímetros, fue fabricado a mano utilizando hoja de aluminio de 0.5mm de espesor. Los prototipos guardan una relación de 1:250. El objetivo por el cual se realizaron dos prototipos con esta relación de tamaño es

investigar las implicaciones del escalamiento en las dimensiones con respecto a la fuerza electrostática y a la rigidez mecánica, y de esta forma extrapolar los resultados del macro modelo al micro modelo, el cual es mucho más difícil de verificar debido a lo reducido de sus dimensiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica por los apoyos de Fomento a la Generación y Aplicación Innovadora del Conocimiento otorgados al proyecto «Diseño de microespejos MEMS» mediante oficio Promep/103.5/08/6463.

Referencias

- Marc J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*. CRC Publisher, 2002.
- Franssila Sami. *Introduction to Microfabrication*. Editorial Wiley, 2004.
- Julian W. Gardner. *Microsensors, MEMS and Smart Devices*. Editorial Wiley.
- Liu Chang. *Foundations of MEMS*. Editorial Prentice Hall, 2005.
- Mohamed Gad-el-Hak (Editor). *The MEMS Handbook*, Editorial CRC Press.
- Nadim Maluf. *An Introduction to Microelectromechanical Systems*. Editorial Artech, 2000.
- Stephen D. Senturia. *Microsystem Design*. Springer, 2004.
- Gregory T. Kovacs, *Micromachined Transducers Sourcebook*. McGraw-Hill, 1998.
- Gabriel M. Rebeiz. *RF MEMS: Theory, Design, and Tech*. Wiley-Interscience; 2002.
- John A. Pelesko, David H. Bernstein. *Modeling MEMS and NEMS*. CRC Pub., 2002.
- Steven S. Saliterman. *Fundamentals of BioMEMS and Medical Microdevices*. Editorial SPIE Publications, 2006.
- Cenk Acar and Andrei Shkel. *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness*. Editorial Springer.
- Stephen A. Campbell. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. Oxford University Press, USA; 2001.
- Richard C. Jaeger. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. Prentice Hall; 2001.
- Matthew N. O. Sadiku. *Elements of Electromagnetics*. Oxford University Press, USA; 2006.
- PolyMUMPs Fabrication Process*, <www.memscap.com/en_mumps.html>.
- Tanner Layout Editor (L-Edit), Tanner Research Inc., <www.tanner.com/>.
- R. Campos-Rodríguez, J. Mireles-García. «Thermal and Electrostatic 2-DOF Micromirror», vol. 1, pp 1-6, *Proceedings of the TexMEMS-VIII International Workshop*, The University of Texas at Dallas, Oct 9, 2006.

Caracterización de un acelerómetro micromaquinado con tecnología PolyMUMPS

Rodolfo Rincón Jara, Roberto Ambrosio Lázaro, José Mireles García, Abimael Jiménez
 Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada (CICTA), Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Departamento de Eléctrica y Computación, Av. Del Charro 450 Norte, C.P. 32310, Cd. Juárez, Chihuahua, México.

Resumen: Actualmente los acelerómetros MEMS se fabrican con los dos procesos más importantes en cuanto a microfabricación: el micromaquinado en volumen y el micromaquinado en superficie. Se prefiere el segundo cuando se desea la integración del dispositivo mecánico con los circuitos eléctricos de acondicionamiento de la señal en un mismo encapsulado [1]. Los principales métodos de transducción para los acelerómetros son el capacitivo y el piezoresistivo, siendo el capacitivo el más utilizado debido a que puede fabricarse con los procesos de micromaquinado convencionales. Las ventajas de un sensado capacitivo son el bajo ruido browniano en su estructura, la fácil realización con los procesos convencionales y la alta sensibilidad. En este capítulo se presenta el análisis y caracterización de un acelerómetro del tipo capacitivo, diseñado y fabricado con tecnología PolyMUMPS [2]. El acelerómetro capacitivo diseñado en el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada consta de una masa de prueba suspendida entre dos electrodos fijos para sensar la diferencia de capacitancia. La estructura del acelerómetro fue simulada con el *software* CoventorWare®. Los resultados del modelado matemático y las simulaciones del dispositivo indicaron que se necesitaría un sistema lector de capacitancia con resolución en el rango de los fempto faradios (*fF*) para condiciones dinámicas. Por lo tanto, también se presenta una técnica para obtener los parámetros de operación del acelerómetro utilizando pruebas tanto mecánicas como eléctricas. Las figuras de mérito más importantes obtenidas para el acelerómetro son la sensibilidad y la no linealidad. Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de voltaje en relación a la gravedad de 1.4 mV/g y la no linealidad R^2 presentó una fuerte correlación positiva mejor al 0.8 por ciento, con un rango de sensado de 12g's . Los parámetros de operación de nuestro dispositivo fueron comparados con el estado del arte de algunas publicaciones y con datos experimentales reportados en la bibliografía y se concluye que el diseño propuesto es muy prometedor para aplicaciones en sistemas automotrices. *Palabras clave:* Acelerómetro, MEMS, PolyMUMPS (*Polysilicon Multi-User MEMS Process*), masa sísmica, frecuencia de resonancia, sensores capacitivos.

Introducción

Un acelerómetro es un dispositivo electromecánico que mide las fuerzas de aceleración producidas por la gravedad o por el movimiento. Estos dispositivos son de dimensiones mayores al micrómetro y menores al milímetro con niveles de sensibilidad y error muy pequeños. La unidad de medición de los acelerómetros es la gravedad (g's) [1]. La aceleración es medida a través de un sistema de transducción. Existen varios métodos para la transducción, como el sensado pie-

zoeléctrico, piezoresistivo, óptico y el capacitivo. Las ventajas del sensado capacitivo en comparación a los demás métodos, son el bajo ruido browniano, la fácil realización con procesos convencionales y la alta sensibilidad, ventajas por las que se decidió realizar un dispositivo de estas características. Para el sensado en un sistema capacitivo el desplazamiento es detectado por el cambio de capacitancia entre la masa sísmica y los electrodos fijos adyacentes [3]. Estos