

CAPÍTULO I

¿Qué son y para qué sirven los microespejos?

1. Microespejos MEMS

La integración de la tecnología micro-óptica con los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS) ha creado una nueva clase de microsistemas llamados MEMS ópticos (MOEMS). En estos sistemas, se utiliza el movimiento mecánico de los mismos, para la manipulación de fotones. Esto ha permitido que tengan aplicaciones tan diversas como en sistemas de proyección de imágenes, comunicación mediante fibra óptica, sistemas de rastreo óptico o en óptica adaptiva.

Dentro de esta clase de MEMS se pueden diseñar y poner en funcionamiento dispositivos tales como microespejos e interruptores que, comparados con los lentos sistemas convencionales de interrupción óptico eléctricos, permiten la manipulación eficiente y eficaz de haces lumínicos, lo que los idealiza para realizar funciones ópticas típicas.

De este modo, se han desarrollado numerosos y diferentes tipos de microespejos que han sido ampliamente utilizados en comunicaciones ópticas, microscanners, proyectores, tomógrafos de coherencia óptica, óptica adaptiva, etc. Sin embargo, aún existen ciertas limitaciones en ellos, por ejemplo en la formación de imágenes biomédicas. Algunas de estas limitaciones se deben al tipo de movimiento o deformación que debe tener el espejo

Para producir movimiento mecánico en estos dispositivos (actuación), que son los componentes más delicados para la tecnología óptica, tales como doblar o flexionar sus capas, se utilizan generalmente fuerzas electrostáticas, magnéticas, piezoeléctricas o piezotérmicas. Además, por el tipo de movimiento que presentan los microespejos, pueden clasificarse en cuatro categorías:

- microespejos movibles
- microespejos tipo pistón
- microespejos deformables.
- microespejos torsionales

Dependiendo del tipo de microespejo, se tienen mayores o menores ventajas, para cada uso y/o aplicación. En este sentido, la mayoría de los microespejos son actuados electrostáticamente y manejan voltajes de operación de entre 20 y 100 V

aproximadamente y tienen ángulos pequeños de rotación, lo que ocasiona una baja eficiencia.

También pueden tener un tamaño de apertura relativamente pequeño -de aproximadamente $0.5\mu\text{m}$ - lo que resulta en baja resolución, así como desplazamiento lineal pequeño -menores a los $45\mu\text{m}$ -, lo que conlleva a una baja profundidad para la formación de imágenes y grados de libertad limitados. Sin embargo, un microespejo torsional linealmente controlable, podría lograr un rastreo circunferencial con voltajes menores que los 20V y con aperturas de hasta $0.9\mu\text{m}$ y eso se analizará en los próximos capítulos.

1.1 Microespejos Movibles

Este tipo de microespejos, básicamente presentan un cambio de orientación al momento de moverse. Existen varios tipos de microespejos movibles, que también pueden subdividirse en dos categorías, debido a su modo de funcionar: magnéticamente o electrostáticamente. La figura 1.1 muestra un ejemplo de un microespejo movable.

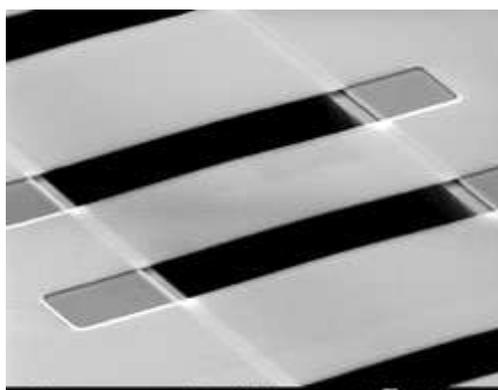


Fig. 1.1 La estructura tipo puente en el medio de la foto es el espejo movable.

Los microespejos que se encuentran en la primera categoría, generalmente presentan mayores desplazamientos y pueden soportar mayores cargas, sin embargo, presentan como principales desventajas, el hecho de que son menos compatibles con el micromaquinado en silicio y que a menudo requieren refrigeración durante su operación.

Los microespejos que pertenecen a la segunda categoría también pueden subdividirse en dos grupos: los de circuitos de excitación en peine, y los de placas paralelas.

Los del primer grupo, usualmente requieren bajos voltajes para su funcionamiento y evitan las bistabilidades que pudieran ocurrir a través de pequeñas áreas del espejo. Este tipo de microespejos han sido ampliamente utilizados y desarrollados en scanner de 2-D y en interruptores ópticos.

Los del segundo grupo, son ideales para mover grandes cargas -dependiendo del tamaño del espejo-. Su rango de movimiento a voltajes moderados es limitado, principalmente porque las membranas de los espejos se encuentran bajo tensión.

La industria de la fotografía, y de los dispositivos periféricos de una computadora, requieren ampliamente de arreglos de microespejos movibles que significan que cada microespejo representa un píxel de la imagen y que a mayor número de microespejos se tengan en cada arreglo, mayor será su resolución; esto se debe a que cada píxel (microespejo) es capaz de alterar la fase de la luz reflejada digitalmente.

La principal desventaja que presentan los microespejos movibles, es que presentan problemas de fricción y bajas velocidades.

1.1.1 Dispositivo de Microespejos Digitales

Un Dispositivo de Microespejos Digitales (DMD) es una matriz de microespejos movibles cada una en un chip (ver figura 1.2). Este dispositivo ha sido desarrollado por Texas Instruments, durante los últimos 20 años. Cada microespejo es un cuadrado de 16 micrómetros de lado con un espacio de 1 micrómetro entre cada uno. El dispositivo reacciona con un procesador que permite a cada espejo moverse en dos direcciones (encendido y apagado). Con esta matriz y el hecho de que un microespejo refleja luz, es sistema es capaz, cuando es iluminado, de reflejar la luz y proyectar una imagen en una pantalla, dependiendo de la señal de entrada generada por el circuito electrónico.



Fig. 1.2 Imagen de un DMD comercial.

El chip se compone de cuatro etapas. La primera contiene la memoria CMOS SRAM que, después de aplicar un voltaje de alimentación, mueve el espejo. La segunda etapa esta compuesta por las almohadillas metálicas de direccionamiento así como los puntos de aterrizaje. La tercera etapa contiene la bisagra de torsión que permite la rotación del espejo y los electrodos de direccionamiento que hacen efectivo el movimiento del espejo. La etapa final es el propio espejo y permite que la reflexión sea efectiva, como se puede ver en la figura 1.3 (a).

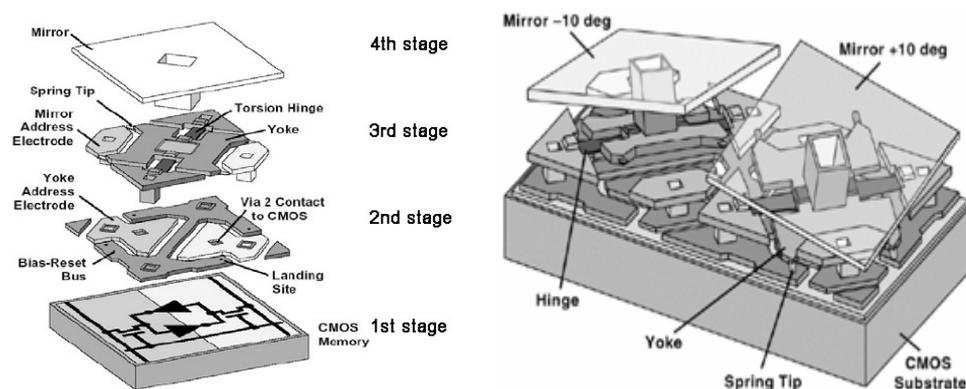


Fig. 1.3 (a) Las 4 etapas de un microespejo en un DMD. (b) La estructura final

Como se puede ver en la figura 1.3 (b) los microespejos pueden rotar alrededor de un único eje definido por las bisagras de torsión en un rango de 10° a -10° dependiendo de qué electrodo esté accionado (izquierda o derecha). Cada electrodo tiene su propio controlador de tal modo que cada microespejo puede ser controlado independientemente y así reflejar la luz (Ver figura 1.4).

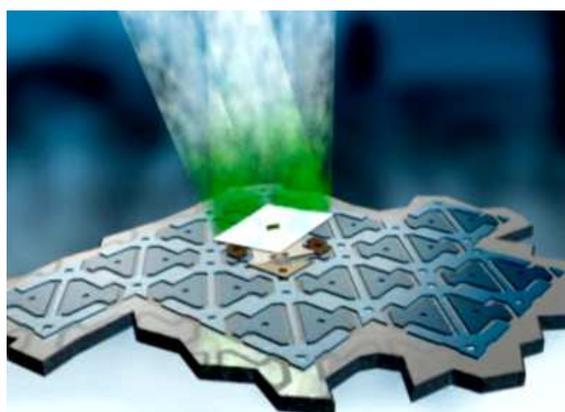


Figura 1.4 Ejemplo de cómo refleja un DMD un haz lumínico

1.2 Microespejos de Pistón

Este tipo de microespejos se caracterizan por cambiar su altura (suben o bajan perpendicularmente al plano del microespejo), uniformemente sin cambiar de forma, al momento de aplicarles una diferencia de potencial, lo que se denomina como movimiento de pistón. Una manera simple de lograr que los microespejos presenten movimiento de pistón, es colocando actuadores electrostáticos planos en paralelo, para que funcionen como moduladores de luz.

Estos dispositivos, pueden utilizarse para modificar la fase espacial de un frente de onda coherente o para modular la fase espacial de haces lumínicos. La figura 1.5 muestra un ejemplo de un microespejo con movimiento de pistón.

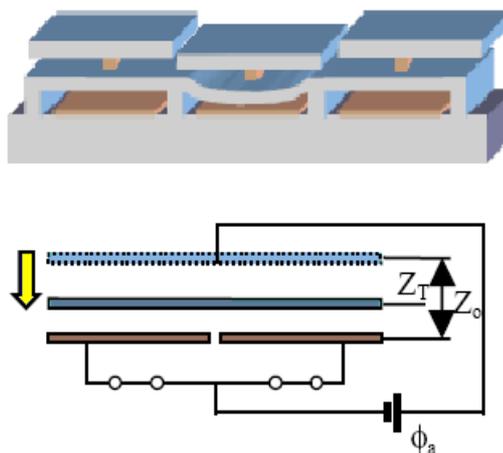


Figura 1.5 Segmento de microespejo con movimiento de pistón y su comportamiento, donde Z_0 y Z_T denotan la posición inicial y final del microespejo, respectivamente.

Para cierto tipo de aplicaciones, se requieren grandes arreglos de microespejos con este tipo de movimiento, por ejemplo en modulación espacial de luz y en la correlación óptica. Estos dispositivos, prometen incrementar su velocidad en órdenes de magnitud, permitiendo además su aplicación en reconocimiento de patrones y en comunicaciones láser, que generalmente requieren respuestas más rápidas que las logradas utilizando dispositivos de cristal líquido.

Sin embargo, debido a su comportamiento no lineal, se hace difícil la selección de sus parámetros de diseño, como son: rectitud, máxima deflexión estática y respuesta en tiempo.

1.3 Microespejos Deformables

Un microespejo deformable puede deformarse como lo hace una membrana, es decir, puede moverse o inclinarse en 3D. La superficie este tipo de microespejos (una membrana de nitruro de silicio) se puede controlar por medio de fuerzas electrostáticas que resultan de aplicar una diferencia de potencial entre un electrodo y la superficie del microespejo. Para permitir el movimiento de la superficie del microespejo, se aplica un voltaje de offset en los electrodos.

Se puede controlar la curvatura resultante de la superficie del microespejo si se desenfoca el frente de onda que incide sobre el microespejo deformable. La figura 1.6 muestra un ejemplo de microespejo deformable.

Por sus características, los microespejos de membrana deformable controlada electrostáticamente, se han convertido en una manera posible de controlar frentes de onda a bajo costo, bajo consumo de energía, tamaño pequeño y ausencia de histéresis en sistemas de óptica adaptiva para varios tipos de aplicaciones. Estas aplicaciones

incluyen la microscopía de doble fotón, la astronomía, pinzas ópticas, acoplamiento lumínico en fibras ópticas y en oftalmología.

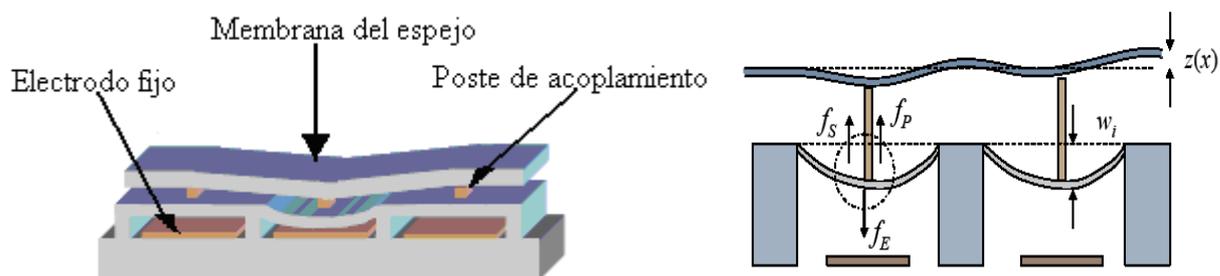


Figura 1.6 Segmento de microespejo con membrana deformable y su comportamiento en fuerzas y desplazamientos.

Como en cualquier microespejo deformable, la curvatura máxima de la membrana es limitada, por tanto, el rango dinámico de curvatura no es un asunto trivial. Además, el microespejo presenta cierta aberración inicial debida a la tensión inicial en el sustrato, lo que provoca una deformación en los bordes de la membrana.

Otro inconveniente que se presenta es que el grado de deformación de un microespejo deformable no puede controlarse con precisión fácilmente, lo que limita sus aplicaciones.

1.4 Microespejos Torsionales

Los microespejos torsionales deflexionan espacialmente la luz incidente en su superficie, rotando su placa reflejante, como se muestra en la figura 1.7.

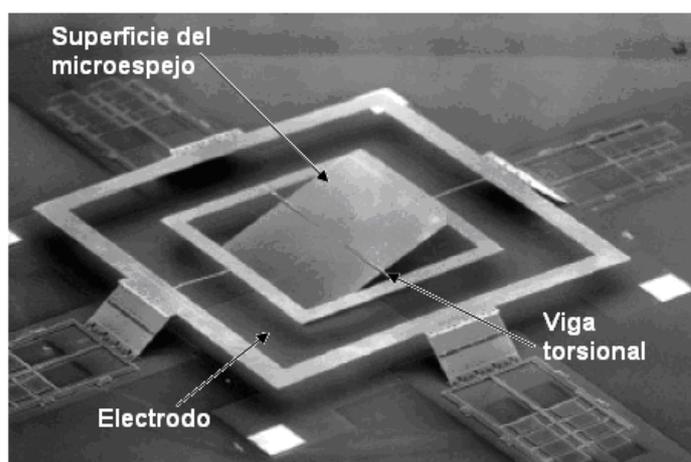


Figura 1.7 Ejemplo de un microespejo torsional

El comportamiento de este tipo de microespejos se puede observar en la figura 1.8 donde un haz de luz incidente es reflejado hacia la posición 1 por el metal reflector que recubre la placa del microespejo, soportada por dos vigas torsionales, cuando la placa

del microespejo se encuentra en su posición original, es decir, horizontalmente. Esta posición corresponde a su estado “apagado”.

Cuando un voltaje de accionamiento V se aplica entre la placa reflejante y el metal de uno o más electrodos que se encuentren sobre el sustrato debajo de la placa del microespejo, la placa girará hacia el electrodo atraída por este, rotando su superficie relativamente a un plano, es decir, sobre el eje de las vigas torsionales. En este caso, la luz incidente será reflejada hacia la posición 2, correspondiendo a un estado de “encendido” del microespejo torsional.

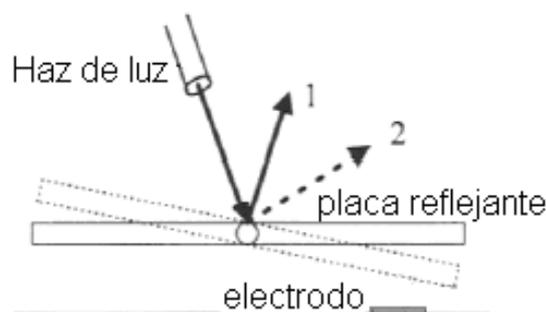


Figura 1.8 Comportamiento de un microespejo torsional

Comparados con los microespejos de pistón, este tipo de microespejo presenta ventajas de consideración, por ejemplo, buena respuesta dinámica y una pequeña posibilidad de adhesión.

Por estas razones, los microespejos torsionales han sido ampliamente utilizados en diversas aplicaciones que requieren altas velocidades y grandes arreglos, tales como , proyectores digitales, interruptores de barras de cruce óptico, comunicaciones ópticas, exploración con láser, óptica adaptiva y en modulación espacial de luz. Para cada tipo de aplicación, estos microespejos pueden presentarse en diferentes arreglos.

Los requerimientos para el funcionamiento de un microespejo torsionales en 2-D, generalmente incluyen frecuencias de resonancia, rectitud del espejo, ángulo máximo de rotación, voltaje máximo de operación y tiempo de estabilización. Para cubrir todos estos requerimientos es esencial diseñar una metodología que pueda describir con precisión su comportamiento electromecánico y, al mismo tiempo, incorporar su tecnología de fabricación.

La descripción y predicción del comportamiento de un microespejo torsional se puede efectuar si se realiza un análisis teórico tanto de sus características estáticas como de sus características dinámicas. Es decir, el comportamiento estático y dinámico de un microespejo torsional, es muy importante para el diseño y optimización de nuevos microespejos de este tipo y para controlar su comportamiento.

Las características estáticas de un microespejo torsional pueden analizarse utilizando formas y ecuaciones normalizadas que representen la relación entre el voltaje de operación aplicado, el ángulo de rotación del microespejo; además de las relaciones directas entre el voltaje máximo de operación, el fenómeno de caída instantánea (pull-in), los parámetros de los electrodos y el ángulo de caída instantánea.

Las características dinámicas de un microespejo torsional pueden analizarse mediante un modelo dinámico no lineal del microespejo, considerando el efecto de acoplamiento entre la torsión y la deflexión, dado que estos tipos de movimientos se consideran de difícil análisis, y no han sido estudiados tan ampliamente como lo son las características estáticas de los microespejos torsionales.

Para poder analizar y validar tanto las características estáticas como dinámicas del microespejo torsional propuesto, se utilizaron algunos métodos computacionales que nos ofrece el software especializado para el diseño de MEMS (COVENTOR WARE).