



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“DISEÑO DE UN MICROESPEJO TORSIONAL PARA  
CONSTRUIR UN MICROESPEJO DEFORMABLE”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA**

P R E S E N T A:

DIANA CITLALI JUÁREZ SALAZAR

ASESOR: M.I. EDUARDO RAMÍREZ SÁNCHEZ

MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer a mis padres Remedios y Francisco, quienes me dieron la vida, su cariño, apoyo y uno que otro regaño, para poder salir adelante en cada paso de mi vida. Ellos me inculcaron valores básicos como el amor, el deber, el trabajo y la honestidad, que hoy atesoro como la herencia más valiosa que pudieron darme.*

*A mis hermanas Alma y Marisol quienes a pesar de que no entendían mucho de lo que hacía, cubrieron varias horas de quehaceres extra apoyándome para lograr esta meta, eslabón fundamental en mi vida profesional.*

*A Humberto, quien con su gran amor, paciencia y apoyo me alentó siempre a levantarme y seguir adelante, imprimiéndome confianza en mí misma, cuando más flaqueó mi voluntad.*

*A mi familia, que como sólida cadena de cariño y unión, ha fungido como fuente de inspiración para cernir mi pensamiento en las alturas, querer volar en las regiones altas y anidar donde anidan las águilas.*

*A mis amigos Adriana, Alejandra, Nazul, Sandra y Susana (por orden alfabético) -y a los que no nombré por falta de espacio, pero están en mi lista-, quienes durante toda mi vida como universitaria, han compartido conmigo momentos de retos y felicidad, brindándome su invaluable amistad, soporte y afecto.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y sus profesores, aquellos que más que cátedra, impartieron lecciones de vida, por haberme hecho una persona más libre y responsable, comprometida conmigo misma y mi país.*

*D. C. J. S.*

---

<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>IV</b>
<b><u>OBJETIVO DE LA TESIS</u></b> .....	<b>VI</b>
<b><u>METODOLOGÍA</u></b> .....	<b>VI</b>
<b><u>CAPÍTULO I</u></b>	
<b>1. MICROESPEJOS MEMS</b> .....	<b>- 1 -</b>
1.1 Microespejos Movibles .....	- 2 -
1.1.1 Dispositivo de Microespejos Digitales .....	- 3 -
1.2 Microespejos de Pistón .....	- 4 -
1.3 Microespejos deformables .....	- 5 -
1.4 Microespejos Torsionales .....	- 6 -
<b><u>CAPÍTULO II</u></b>	
<b>2. PROCESOS Y TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE MICROSISTEMAS</b> .....	<b>9</b>
2.1 Micromaquinado de superficie.....	9
2.1.1 El silicio como material primordial de las estructuras microelectrónicas .....	10
2.1.2 Proceso de construcción y atacado del silicio al construir un microsistema .....	11
2.1.2.1 Oxidación Térmica.....	11
2.1.2.1.a) Oxidación térmica húmeda. ....	11
2.1.2.1.b) Oxidación térmica seca.....	12
2.1.2.2 Deposición .....	12
2.1.2.2.a) Deposición Física en Fase Vapor (LPPVD). ....	12
2.1.2.2.b) Deposición Química en Fase Vapor (LPCVD).....	13
2.1.2.3 Litografía .....	14
2.1.2.4 Grabado .....	15
2.1.2.5 Difusión .....	16
2.1.3 Ventajas principales del proceso de micromaquinado en superficie.....	17
2.1.4 Procesos MUMPS .....	17
2.1.4.1 Proceso PolyMUMPS .....	18
2.2 Micromaquinado en volumen.....	19
2.3 Proceso LIGA.....	20
<b><u>CAPÍTULO III</u></b>	
<b>3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>

---

3.1 Análisis Teórico De Las Características Estáticas Del Microespejo Torsional .....	23
3.1.1 El Principio Del Capacitor y El Momento Torsional Electroestático. ....	23
3.1.2 Relación Estática Entre El Voltaje De Operación Y El Ángulo De Rotación. ....	26
3.1.3 Estudio Del Efecto Caída Instantánea .....	28
3.1.4 Estudio Del Efecto De Adhesión Momentánea .....	33
3.2 Análisis Teórico de las Características Dinámicas Del Microespejo Torsional.....	35
3.2.1 Doblez De Las Vigas Torsionales Debido A La Masa Del Microespejo .....	36
3.2.2 Desplazamiento Angular De Las Vigas Torsionales.....	38
3.2.3 Frecuencia De Vibración Para La Estructura Del Microespejo. ....	39
3.2.4 Frecuencia De Vibración De La Viga Torsional.....	39
3.2.5 Diferentes Fuerzas De Amortiguamiento Para El Microespejo Torsional.....	40
3.2.6 Amortiguamiento De la Vibración oscilatoria del microespejo.....	41
3.2.7 Respuesta Del Microespejo Torsional A Una Fuerza Escalón.....	43
3.3 Acoplamiento Dinámico Entre Los Efectos De Deflexión Y Torsión.....	45
3.3.1 Respuesta A Una Fuerza Escalón Del Modelo Con Acoplamiento Dinámico .....	48
3.3.1.1 Respuesta A Una Fuerza Escalón Sin Amortiguamiento.....	48
3.3.1.2 Respuesta Escalón Del Microespejo Con Amortiguamiento Viscoso .....	50
3.3.2 Respuesta armónica del microespejo .....	50

## **CAPÍTULO IV**

<b>4. DISEÑO DEL MICROESPEJO PARA SIMULACIÓN.....</b>	<b>52</b>
4.1 Especificaciones De Diseño Para El Microespejo .....	52
4.2 Método de Elementos Finitos .....	53
4.2.1 División del sistema.....	54
4.2.2 Ecuación de Potencial.....	54
4.2.3 Condiciones de frontera.....	54
4.2.4 Cálculo de los potenciales.....	54
4.2.5 Resolución de las ecuaciones planteadas. ....	55
4.2.6 Interpretación de resultados.....	55
4.3 Simulaciones de Elemento Finito.....	55
4.3.1 CoventorWare.....	55
4.3.1.1 Base de datos de Propiedades de los materiales.....	56
4.3.1.2 Editor de Procesos. ....	56
4.3.1.3 Arquitecto.....	56
4.3.1.4 Diseñador.....	56
4.3.1.5 Mallado.....	56
4.3.1.6 Analizador.....	56
4.3.1.7 Visualizador.....	57
4.3.2 Proceso de Simulación en Coventor Ware.....	57
4.3.2.1 Construcción del Modelo .....	57
4.4 Obtención de resultados .....	63
4.4.1 Parámetros utilizados para la simulación.....	63
4.4.1.1 Resultados de la simulación del desplazamiento del microespejo.....	66
4.4.1.2 Relación entre los ángulos de desplazamiento y el voltaje aplicado.....	68
4.4.1.3 Resultados de la simulación de fuerza de reacción en las vigas.....	69
4.4.1.4 Resultados de la simulación de modos de frecuencia de vibración.....	71

**CAPÍTULO V**

**5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... 73**

5.1 Propiedades del péndulo ..... 73

5.2 El ángulo de inclinación y la linealidad ..... 75

5.3 Modos de vibración ..... 76

5.4 El modelo físico ..... 76

**CAPÍTULO VI**

**6. CONCLUSIONES ..... 79**

**BIBLIOGRAFÍA ..... I**

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo, forma parte del proyecto de investigación llamado “Diseño e Implementación de un espejo deformable basado en tecnologías MEMS para aplicaciones de óptica adaptiva”, del grupo UNAMems de la Facultad de Ingeniería, registrado en el programa PAPIIT con el número IN 109506-3. Además es resultado de mi compromiso como universitaria para mantener a esta casa de estudios como la mas importante institución educativa en México siempre a la vanguardia tecnológica, ya que los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS, por sus siglas en ingles) son una tecnología relativamente reciente, con no más de tres décadas desde su nacimiento.

De acuerdo con lo anterior, el estudio y desarrollo del área de los dispositivos basados en la tecnología de procesamiento de semiconductores, llamados Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS), promete revolucionar una gran variedad de productos al unir la microelectrónica basada en silicio con las técnicas de micromaquinado, haciendo a la tecnología de los MEMS extremadamente diversa y fértil.

Los MEMS utilizan una combinación de funciones mecánicas y eléctricas, para poder medir, controlar y hacer funcionar con precisión, dispositivos en escalas micrométricas, es decir, son la integración de varios elementos -mecánicos, electrónicos, sensores, y actuadores- en un sustrato común de silicio.

Esto es posible ya que los MEMS son manufacturados utilizando técnicas de fabricación similares a las utilizadas para crear Circuitos Integrados, logrando niveles sin precedente de funcionalidad, capacidad de realización y sofisticación, dado que pueden ser colocados varios sistemas completos MEMS en un pequeño chip de silicio a un costo relativamente bajo (ya que un tercio de su valor corresponde al empaque, porque para cada aplicación se requiere un empaque distinto y aún no puede estandarizarse un empaque común).

Cuando se consideran dispositivos pequeños, una cantidad de efectos físicos tienen un significado diferente a escala micrométrica respecto a la escala macroscópica. Esto representa grandes ventajas que los MEMS tienen sobre los dispositivos tradicionales para las mismas aplicaciones, entre las que se encuentran: mayores velocidades, bajos costos y masas menores.

El desarrollo de los MEMS además esta provocando un cambio en el estilo de vida, al tener aplicaciones en áreas tan diversas como son la automotriz, la biomédica o los sistemas de comunicación, entre muchas otras.

A pesar de que la tecnología de los MEMS es relativamente reciente, el mercado de su industria -que incluye sensores de bolsa de aire para automóviles, sensores de presión con base de silicio, procesadores digitales de luz (DLP) para proyectores, interruptores opto-

mecánicos para todo tipo de canales y cartuchos para impresoras de inyección de tinta, etc.- se expandirá más allá del actualmente identificado, pudiéndose esperar muchas y nuevas aplicaciones.

Por ejemplo, en 2004 las ventas totales de MEMS alcanzaron los 33.5 billones de dólares y se tiene un estimado de 57 billones de dólares para el 2009, lo que representa una tasa de crecimiento anual del 16%.

De igual modo, los avances logrados en materia de sistemas ópticos y su aplicación, han estimulado un gran interés en el desarrollo de MEMS, para la manipulación de haces lumínicos, como por ejemplo el área de los microespejos.

Esta área forma parte del rubro de la electrónica de consumo, la cual goza actualmente del 6% del total de ventas, siendo la tendencia que este porcentaje incremente hasta un 20% para el 2009, debido principalmente a las aplicaciones comerciales que se tienen, como en pantallas planas, juguetes electrónicos y videojuegos, que utilizan microcircuitos con millones de microespejos para proyectar imágenes de alta resolución y contraste.

El uso de microespejos MEMS, también se ha vuelto fundamental para redes ópticas de información pues permiten controlar y orientar las señales ópticas sin modificarlas, evitando el alto costo de la conversión óptica-eléctrica en las redes convencionales.

Otras estructuras como conmutadores de fibra y moduladores incluyen arreglos más complicados de microespejos móviles -que orientan los haces de luz de acuerdo con sus destinos-. Estos arreglos consisten en matrices de microespejos que se activan mediante señales eléctricas. Sin embargo, uno de los mayores retos a la hora de producir este tipo de sistemas MEMS, consiste en conectar la electrónica de cada espejo, cuya complejidad aumenta con el nivel de control que se desee.

En este trabajo, primeramente se hace una introducción sobre qué es y qué tipos de microespejos existen actualmente, cuáles son sus características de funcionamiento y sus aplicaciones más comunes, además que se explica brevemente qué tipos de procedimientos existen para poder fabricar estos sistemas.

Posteriormente, se profundiza específicamente en los microespejos torsionales y se realiza un análisis de las características estáticas y dinámicas de este tipo de microespejo, además de que se propone un banco de microespejos torsionales con comportamiento lineal. Por último se explica el método de diseño y simulación por medio del software Coventor Ware y se dan a conocer las conclusiones del este trabajo con miras en su aplicación para óptica adaptiva.

El diseño del microespejo torsional propuesto fue fabricado en la planta MEMSCAP, bajo el proceso PolyMUMPS, sin embargo en este trabajo no se abarca su caracterización.



## **Objetivo de la Tesis.**

Análisis y diseño de un espejo torsional que, bajo ciertas condiciones de voltaje, se comporte de manera lineal y resista a las fuerzas a las que se le sometan, con la finalidad de validar el diseño. Este trabajo únicamente abarcará la parte de análisis, diseño y simulación, sin embargo al validar el microespejo propuesto se sentarán las bases para poder formar una matriz de microespejos torsionales que asemeje el movimiento de un microespejo deformable, con posibles aplicaciones en óptica adaptiva.

## **Metodología**

Se realizó una investigación documental a cerca de los diferentes tipos de microespejos, se definió el diseño del microespejo torsional a utilizar, así como el proceso de microfabricación del mismo. Posteriormente se realizó un análisis computarizado mediante el software de diseño y análisis MEMS en Coventor Ware y finalmente se plasmaron las conclusiones.

## **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).

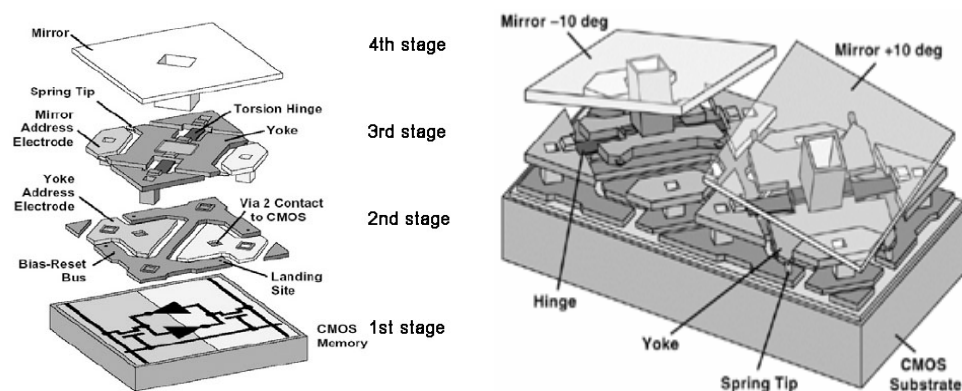


Fig. 1.3 (a) Las 4 etapas de un microespejo en un DMD. (b) La estructura final

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  $10^\circ$  a  $-10^\circ$  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).

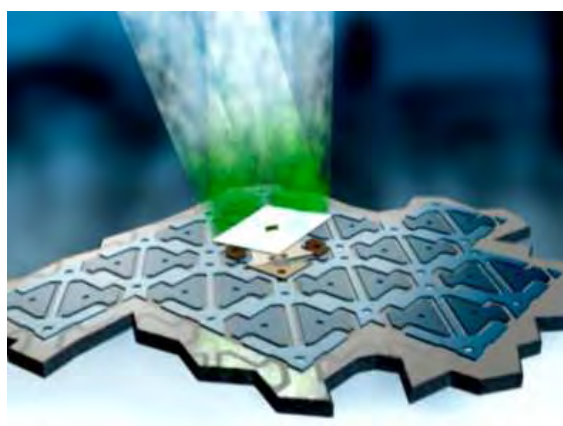


Figura 1.4 Ejemplo de cómo refleja un DMD un haz lumínico

## 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.

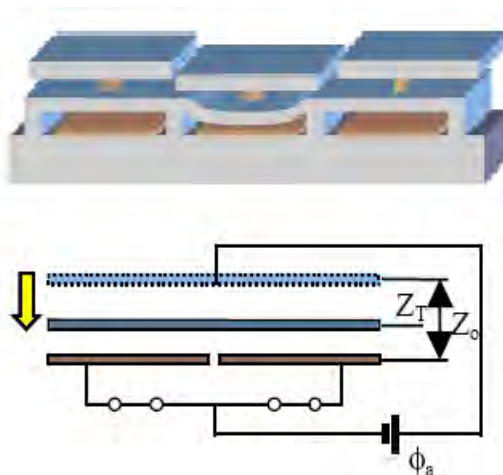


Figura 1.5 Segmento de microespejo con movimiento de pistón y su comportamiento, donde  $Z_0$  y  $Z_T$  denotan la posición inicial y final del microespejo, respectivamente.

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.

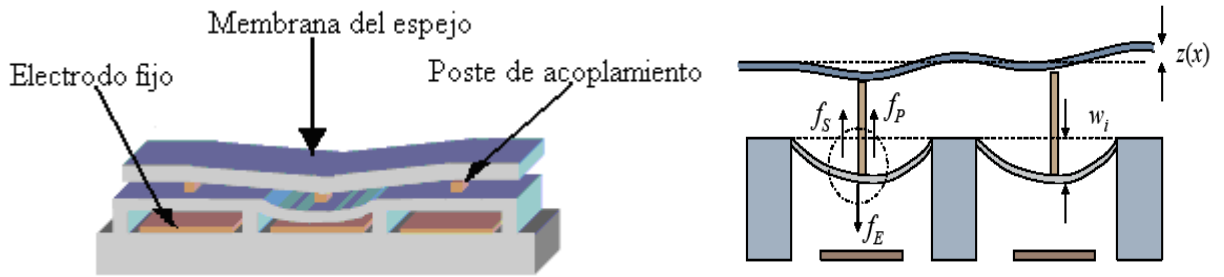


Figura 1.6 Segmento de microespejo con membrana deformable y su comportamiento en fuerzas y desplazamientos.

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.

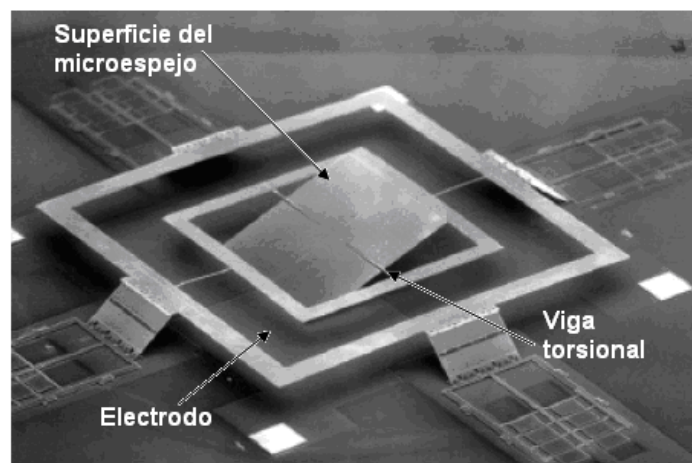


Figura 1.7 Ejemplo de un microespejo torsional

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.

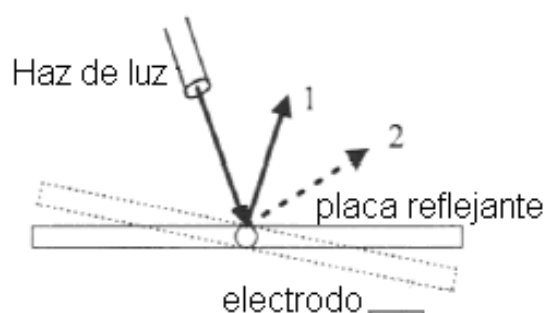


Figura 1.8 Comportamiento de un microespejo torsional

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).

## **CAPÍTULO II**

### ¿Cómo se construyen los microespejos MEMS?

#### **2. Procesos y Técnicas de Fabricación de Microsistemas**

A pesar de que los microsistemas y en nuestro caso particular los microespejos MEMS, parecen estructuras muy complejas y de difícil construcción, existen varios procesos de fabricación que simplifican su manufactura, llamados procesos de micromaquinado.

Los procesos de micromaquinado reúnen las técnicas usadas para producir las estructuras y partes móviles de los dispositivos microconstruidos. Entre estos procesos, los más comunes son: el micromaquinado de superficie, el micromaquinado en volumen y el proceso LIGA (por sus siglas en alemán) con rayos X.

Se explicará brevemente cada uno de ellos pero se hará énfasis en el proceso PolyMUMPs, que es un micromaquinado de superficie en siete etapas que provee la compañía de fabricación de MEMS, MEMSCAP que es en donde se construirá el y la matriz de microespejos.

#### **2.1 Micromaquinado de Superficie**

El micromaquinado de superficie es una de las mejores técnicas que se han desarrollado ya que silicio es el material usado en la producción de circuitos electrónicos (ver figura 2.1).

Además el proceso es muy adecuado para la producción de estructuras micromecánicas móviles sobre la superficie de una oblea de silicio, mediante el depósito de capas estructurales rígidas y de sacrificio, a las cuales se les transfiere un patrón de diseño utilizando técnicas fotolitográficas, para generar la microestructura.

Al final del proceso, las capas de sacrificio son removidas mediante atacados químicos, quedando así un dispositivo completamente ensamblado a microescala.

De este modo se depositan y se transfieren patrones para otras capas, tanto de sacrificio como de estructura, construyendo así la estructura completa del dispositivo. A continuación se explicará más a detalle cada etapa del proceso.

### 2.1.1 El silicio como material primordial de las estructuras microelectrónicas

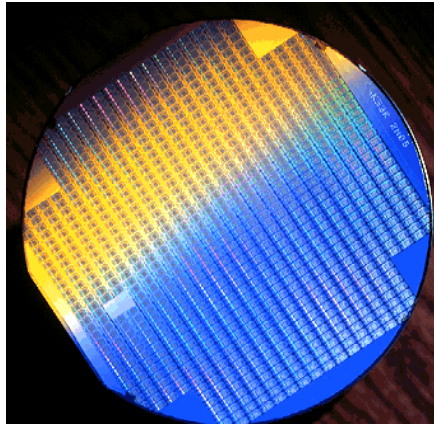


Figura 2.1 Oblea de silicio llena de chips de memoria.

El silicio se maneja por facilidad en forma de obleas, que son rebanadas obtenidas de un largo lingote de silicio crecido de una semilla cristalina. De este modo, los átomos de silicio están arreglados en una estructura cristalina, y la oblea resultante es silicio monocristalino.

Al cortar las obleas, se obtienen ciertos planos cristalográficos paralelos al plano de corte de obtención de la oblea, llamados índices de Miller, los cuales indican el plano cristalino de cómo fue cortado el silicio y a su vez, deben ser especificados por el fabricante (ver Figura 2.2).

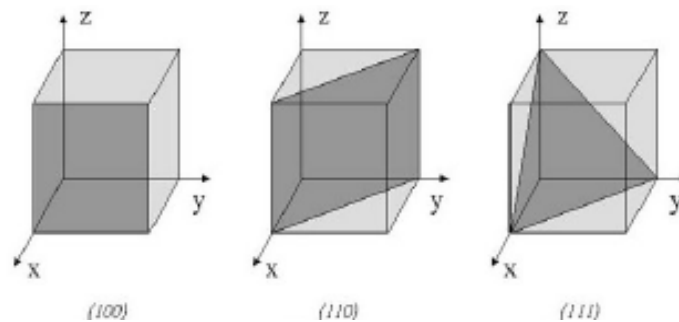


Figura 2.2 Índices de Miller para los planos cristalográficos del silicio

El micromaquinado en superficie se sustenta casi íntegramente en las técnicas básicas para la fabricación de un circuito integrado (oxidación térmica, deposición de películas delgadas, creación de máscaras, litografía, grabado y difusión).

De este modo, este proceso se traduce en el método básico y más utilizado para definir estructuras micromecánicas, en el cual se transfiere la información de un patrón contenido en una máscara para lograr las formas y dimensiones de diseño de estas estructuras.

## 2.1.2 Proceso de construcción y atacado del silicio al construir un microsistema

### 2.1.2.1 Oxidación Térmica

La oxidación térmica sirve para hacer crecer o depositar una capa de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) sobre una oblea. La oxidación térmica además puede tener varios propósitos: como máscara para el proceso de dopado, como capa aislante de óxido grueso o como capa dieléctrica de óxido delgado (ver figura 2.3).

Como al aplicar la oxidación a la superficie del silicio, esta consume parte del silicio, aproximadamente un 4% del grosor final del  $\text{SiO}_2$ , puede utilizarse esta técnica para igualar capas anteriores.

Por otra parte, si lo que se desea es hacer crecer el nivel de silicio se puede utilizar alguna de las dos variantes de la técnica de oxidación térmica, que son la oxidación térmica húmeda y la oxidación térmica seca.

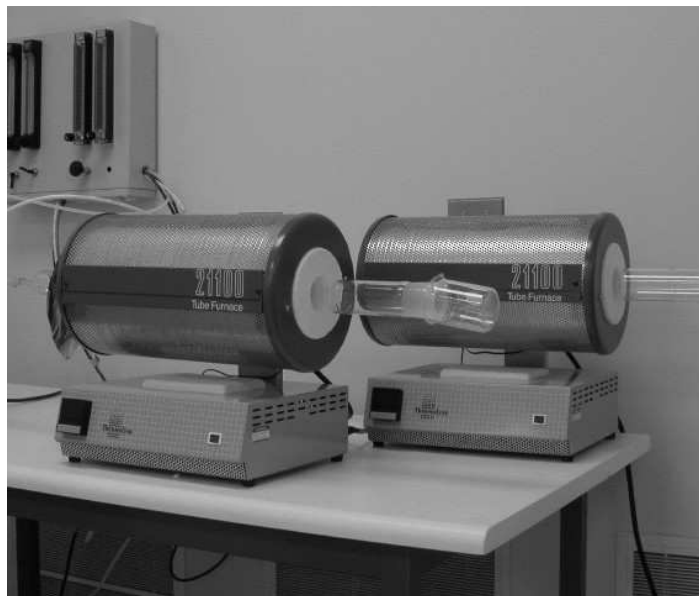


Figura 2.3 Hornos para oxidación térmica.

La oxidación húmeda se realiza introduciendo oxígeno puro o vapor de oxígeno y agua sobre una oblea a altas temperaturas dentro del horno.

#### 2.1.2.1.a) Oxidación térmica húmeda.

Esta técnica utiliza vapor de agua como oxidante sobre la oblea, a una temperatura de 900 a 1000 grados. Es un proceso rápido en el que crece  $1 \mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  cada 2 horas. Sin embargo, se tiene un control mínimo sobre el crecimiento del silicio y por lo tanto se utiliza comúnmente para crear capas aislantes o dieléctricas de baja calidad.

### **2.1.2.1.b) Oxidación térmica seca.**

Esta técnica utiliza al oxígeno como oxidante exponiendo a la oblea a una atmósfera rica en moléculas de este elemento, a una temperatura de entre los 1100 y 1200 grados. Es un proceso lento en el que crece 1  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  en 40 horas.

La gran ventaja de la técnica es que se tiene una mayor precisión y control del grosor del óxido, logrando así capas con excelentes propiedades dieléctricas, densas y regulares.

### **2.1.2.2 Deposición**

Ésta técnica deposita una capa fina de una sustancia o material encima de la oblea, ya sean óxidos, polisilicio, metales o semiconductores de estructura cristalina, para después eliminarla selectivamente con el proceso fotolitográfico y de oxidación. De esta manera, se “recorta” el material para obtener la capa con la forma y dimensiones que se desean.

Existen dos tipos de procesos, uno físico y el otro químico, los cuales se basan en introducir sustancias en estado gaseoso a baja presión, sin embargo no se abundará en describir a detalle ninguno de ellos:

#### **2.1.2.2.a) Deposición Física en fase vapor, *Physical Vapor Deposition* (LPPVD).**

En este proceso no hay reacción química con el sustrato durante el depósito de las películas delgadas, cuyas composiciones químicas son independientes entre sí, lo que significa que no hay consumo de los materiales ni del sustrato ni de las películas. Además permite hacer depósito de una gran variedad de materiales, lo que lo hace de uso común.

Sin embargo, las películas delgadas pueden reflejar la topología del sustrato, lo que puede traducirse en espesores no uniformes y rompimientos, lo que trae consigo distribuciones no uniformes en la densidad de corriente.

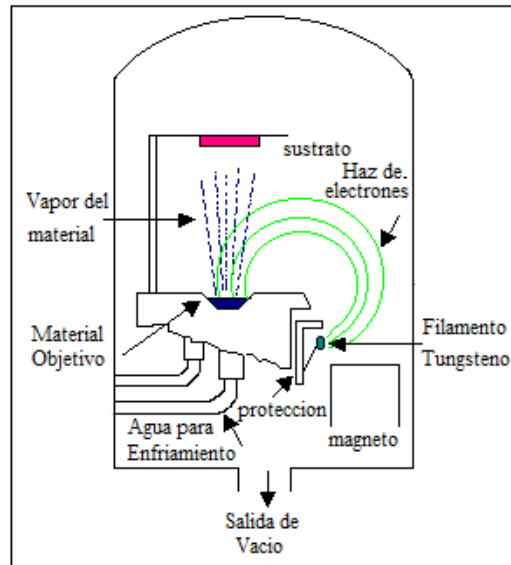


Figura 2.4 Ejemplo del proceso de Deposición Física en Vapor

Existen también variantes de este proceso en cuanto a los sistemas de evaporación, como son la inserción iónica -en la que la evaporación se produce por el calentamiento de un haz de electrones sobre un metal-, la evaporación por arco -en la que la evaporación se produce por efecto de un arco eléctrico desplazándose sobre el metal, o la pulverización catódica, en el que la evaporación se produce por el bombardeo de iones de un gas inerte sobre el metal. En la figura 2.4 se observa un ejemplo de este proceso.

#### 2.1.2.2.b) Deposición Química en Fase Vapor *Chemical Vapor Deposition (LPCVD)*.

En este proceso, diferentes materiales o elementos en fase gaseosa, como monocristales, policristales y amorfos, reaccionan químicamente a presiones relativamente altas y se precipitan sobre la superficie de la oblea para producir el material depositado.

Por ejemplo, en la deposición química como la que se ve en la figura 2.5, se puede lograr el crecimiento de un monocristalino como el silicio, que tenga la misma estructura cristalina que el sustrato; sin embargo se tiene el inconveniente de que el proceso es muy sensible a posibles defectos y a la contaminación, lo que aumenta los defectos potencialmente.

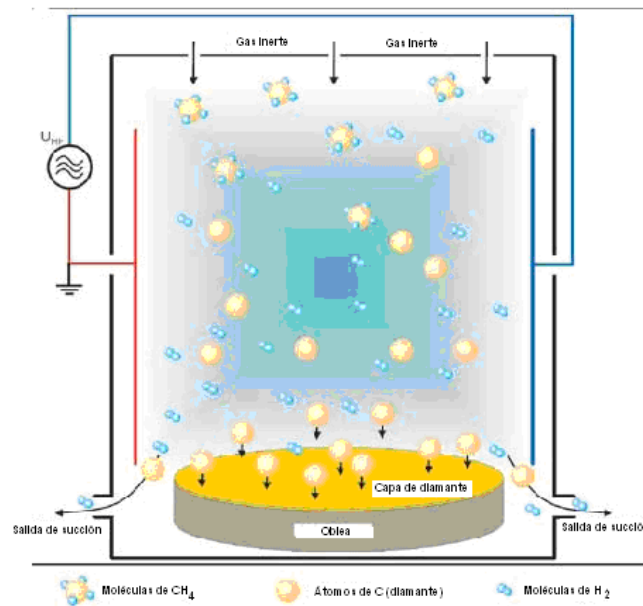


Figura 2.5 Ejemplo del proceso de Deposición Química en Vapor

Algunos métodos para lograr las reacciones en la deposición química son el calor, la luz y el plasma. Estas reacciones se llevan a cabo en un reactor, cuyos subproductos son evacuados al exterior mediante un sistema de bombeo a altas velocidades. En este proceso, las temperaturas son tan elevadas que llegan al rango de los 950°C a los 1000°C.

### 2.1.2.3 Litografía

Este proceso consta de cuatro etapas que se ilustran en la figura 2.6:

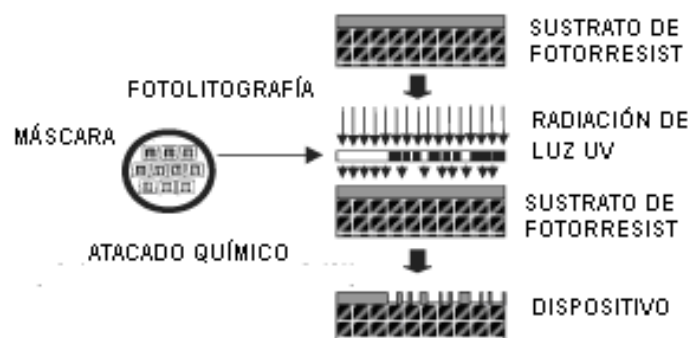


Figura 2.6 Esquema del Proceso Litográfico

2.1.2.3.a) Se produce una máscara que generalmente es de un material transparente como vidrio, cristal o cuarzo, cubierto por un patrón opaco de cromo. Como el microsistema final está construido por diferentes materiales, a cada uno de éstos le corresponde una máscara propia, cuyo patrón dependerá de nuestras especificaciones de diseño.

2.1.2.3.b) Se cubre la oblea de silicio con un material fotosensible, llamado resina o fotoresina que es un polímero sensible a la luz ultravioleta. Existen dos tipos de fotoresina, la positiva y la negativa.

2.1.2.3.c) Se coloca la máscara encima de la fotoresina, con una máquina alineadora que ajusta la oblea a la máscara y entonces se le dirige una luz ultravioleta a la fotoresina a través de la máscara, exponiendo así a la fotoresina con el patrón de la máscara. La fotoresina se activa y adquiere el patrón de la máscara. Cuando incide luz ultravioleta en fotoresina positiva, ésta la debilita, tal que al eliminarla, se tiene la transferencia de una imagen positiva de la máscara. Cuando incide luz ultravioleta en fotoresina negativa, la endurece tal que la fotoresina que no fue expuesta es eliminada, obteniendo una imagen negativa de la máscara. Este paso se puede apreciar en la figura 2.7.

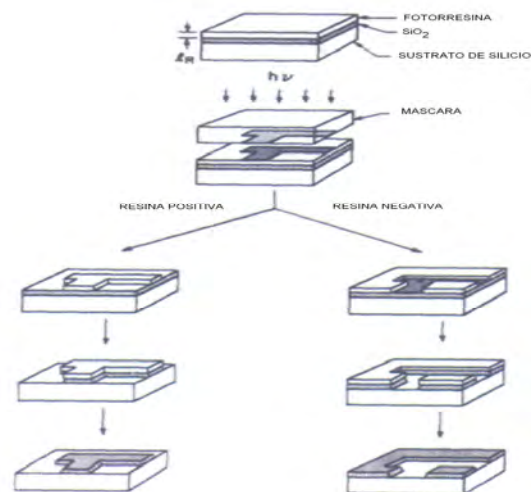


Figura 2.7 Ejemplo de transferencia de información para fotoresina positiva y para fotoresina negativa

2.1.2.3.d) Por último, se ataca la fotoresina no polimerizada con alguna solución química, para disolverla y eliminarla manteniendo los patrones de las máscaras y cuya disolución dependerá de la dureza de la fotoresina. Después se le lava con un disolvente para eliminar cualquier residuo.

#### 2.1.2.4 Grabado

El grabado sirve para remover las áreas que no fueron cubiertas con la fotoresina y eliminar residuos de las zonas donde no queremos que haya material, el cual es atacado eliminándolo en las partes donde no hubo máscara durante el proceso litográfico.

Esta técnica es muy selectiva ya que solo ataca aquello que queremos y puede atacar sobre una o varias direcciones de planos cristalográficos. Existen tres tipos de grabados:



2.1.2.4.a) Químico. En este proceso se elimina el material por reacción química, atacando con agentes químicos en estado líquido que disuelven los materiales. En esta categoría se encuentra el grabado húmedo que puede ser isotrópico o anisotrópico (ver figura 2.8), dependiendo de la solución que se utilice para atacar el material, los diferentes planos cristalográficos y las velocidades de ataque que se deseen. Permite tener un mejor control de las dimensiones y las geometrías.

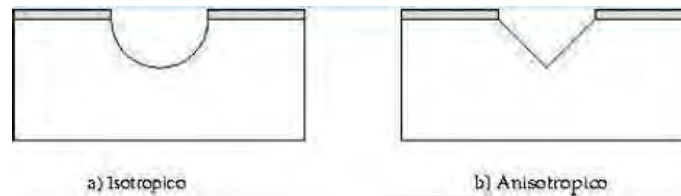


Figura 2.8 Tipos de estructuras después de un grabado a) isotrópico y b) anisotrópico.

2.1.2.4.b) Físico. En este proceso se hace un bombardeo de iones a altas potencias. Es poco selectivo y solo ataca en una dirección.

2.1.2.4.c) Químico-Físico. En este proceso el material es eliminado al bombardearlo con iones que reaccionan químicamente con el.

En esta categoría se encuentra el grabado seco (siendo el más común el proceso RIE, *Reactive Ion Etching*), en el que los iones son acelerados hacia el material, mejorando la grabación en la dirección que viajan los iones. Este tipo de grabado es anisotrópico y no está limitado por la orientación cristalográfica del silicio.

### 2.1.2.5 Difusión

Esta técnica permite que los átomos puedan moverse dentro de un sólido mediante la introducción de éstos en sustratos diferentes. Además permite cambiar las propiedades conductoras del material, introduciendo impurezas en el silicio al sustituir algunos átomos de silicio por átomos de otros elementos, a esto se le llama dopaje. Dependiendo del tipo de impureza con el que se dope el silicio, se pueden tener semiconductores tipo N o tipo P.

Si el silicio es dopado con boro, se obtienen zonas tipo P, en cambio, si se dopa con fósforo, arsénico o antimonio se obtienen zonas tipo N.

Ésta técnica requiere altas temperaturas, entre los 900 y 1100 grados, y la concentración de impurezas no se presenta uniformemente.

El dopado es una función del tiempo, es decir, entre más tiempo estemos exponiendo el silicio al proceso de dopaje, más dopado se presentará el material. Sin embargo, las altas temperaturas después de la difusión pueden provocar una redistribución de las impurezas.

### 2.1.3 Ventajas principales del proceso de micromaquinado en superficie

- ⇒ Compatibilidad con el proceso CMOS
- ⇒ Procesamiento en un solo lado de la oblea
- ⇒ Bajos costos.

En la figura 2.9 se muestra un esquema completo del proceso sobre un plano transversal de la oblea de silicio de un microcantilever.



Figura 2.9 Proceso de micromaquinado de superficie para un microcantilever.

Existen tres parámetros clave en la fabricación de microestructuras utilizando este proceso:

- ⇒ Control de la tensión y del gradiente de tensión en la capa estructural para evitar dobleces o escurrimientos en la estructura liberada.
- ⇒ Gran selectividad del atacante para capas de sacrificio que no afecten a las capas estructurales
- ⇒ Evitar que la estructura liberada se llegue a pegar al sustrato

### 2.1.4 Procesos MUMPS

Los Procesos Multi-Usuario para MEMS o MUMPS, por sus siglas en inglés, forman parte de un programa comercial ofrecido por MEMSCAP, empresa líder en

tecnología MEMS que hace posible que universidades, industrias y gobiernos alrededor del mundo, puedan fabricar sus diseños de MEMS de propósito general a bajos costos.

Los tres procesos estándar ofrecidos por MEMSCAP como parte del programa MUMPS son:

- ⇒ PolyMUMPS: es un proceso de micromaquinado en superficie de dos capas de polisilicio
- ⇒ MetalMUMPS: es un proceso de micromaquinado en níquel eléctricamente chapado
- ⇒ SOIMUMPS: es un proceso de micromaquinado en donde una capa de silicio se coloca sobre un aislante.

De estos tres procesos el que es más utilizado dada su generalidad y flexibilidad con el usuario, es el proceso PolyMUMPS y este es el que se explicará aquí más extensamente y con el cual se construyó el prototipo de microespejo torsional

#### 2.1.4.1 Proceso PolyMUMPS

El proceso PolyMUMPS está concebido como un proceso de micromaquinado en superficie de tres capas de polisilicio y facilita la inclusión de muchos y diferentes diseños sobre la oblea de silicio.

Durante el proceso se hace uso de 8 máscaras y se tienen 7 niveles, uno de nitruro de silicio, 3 de polisilicio, 2 de óxido y uno de metal.

De este modo, y como ya se ha mencionada, las 3 capas de polisilicio son las que conforman la estructura del sistema, utilizando para sostener a la estructura óxido fosfosilicatado (PSG) como material de las capas de sacrificio. De igual manera que en el proceso de micromaquinado convencional, se utiliza una capa de nitruro de silicio como aislante del sustrato.

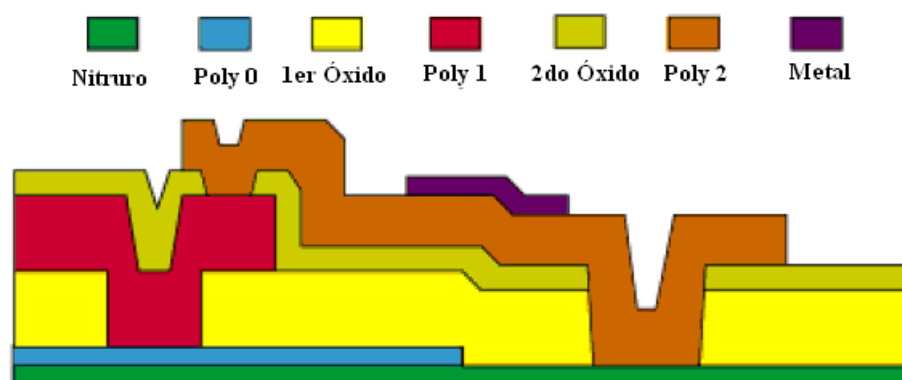


Figura 2.10 Sección transversal de un proceso PolyMUMPS

Como se ve en la figura 2.10 este proceso tiene las características generales del proceso de maquinado en superficie:

- ⇒ Se utiliza polisilicio como material estructural
- ⇒ Se deposita una capa de óxido PSG como capa de sacrificio
- ⇒ Se utiliza una capa de nitruro de silicio como aislante entre el sustrato y el polisilicio.

Sin embargo, la mayor diferencia entre este proceso y el micromaquinado en superficie convencional, es que éste está diseñado para ser lo más general posible y capaz de soportar muchos y diferentes diseños en una sola oblea de silicio.

Sin embargo, como el proceso no está diseñado para fabricar dispositivos con características específicas, el grosor de las capas estructurales y de sacrificio y sus planos, se han establecido para que ajusten al diseño de la mayoría de los usuarios, garantizando el mayor rendimiento posible.

## **2.2 Micromaquinado en Volumen**

El micromaquinado en volumen construye microestructuras en 3D al “cavar” dentro de la oblea de silicio, tomando ventaja de las tres dimensiones espaciales.

Existen dos métodos básicos para formar la estructura en el silicio: el atacado químico anisotrópico y el atacado isotrópico (ver figura 2.10). El anisotrópico utiliza soluciones químicas tales como el KOH que ataca diferentes direcciones cristalográficas, a distintas velocidades.

Ciertos planos cristalográficos son muy lentos de atacar y son llamados planos de paro. El atacado anisotrópico generalmente produce superficies en forma de V, pirámides y canales dentro de la superficie de la oblea de silicio.

El atacado isotrópico ataca a la oblea de silicio en todas direcciones casi con la misma velocidad y produce depresiones redondeadas dentro de la superficie que generalmente se asemejan a esferas o cilindros.

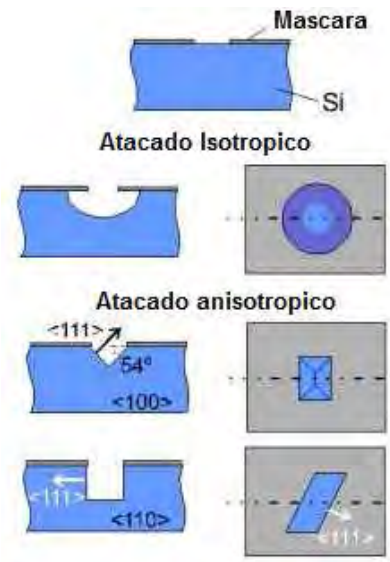


Figura 2.10 Las dos maneras de hacer micromaquinado en volumen

El proceso del micromaquinado en volumen hace uso de la técnica llamada “fusionado de obleas” en el que diferentes obleas de silicio se pegan para unir las permanentemente. Cuando varias obleas se unen para el micromaquinado en volumen, pueden construirse una amplia gama de estructuras mecánicas muy complejas (ver figura 2.11).



Figura 2.11 Acelerómetro construido mediante el “fusionado de obleas”.

El micromaquinado en volumen es entonces, muy similar al micromaquinado en superficie, en el que capas de diferentes materiales se colocan a la vez para luego atacarlas selectivamente con el patrón deseado del dispositivo sobre el sustrato.

Sin embargo, la mayor diferencia entre los dos procesos es que el micromaquinado en volumen puede construir dispositivos en ambos lados del sustrato. Y si se hace correctamente, este proceso puede dejar un gran número de dispositivos libres del sustrato de silicio original.

### 2.3 Proceso LIGA

El proceso Litográfico de Electrodeposición y Moldeado LIGA (por sus siglas en alemán *Lithographie, Galvanoformung und Abformung*), es muy similar tanto al

micromaquinado en volumen como al micromaquinado es superficie, con sus pequeñas grandes diferencias, como se ilustra en la figura 2.12.

La mayor diferencia de este método, es que utiliza una fotoresina que en vez de ser susceptible a los rayos UV, es susceptible a radiación con rayos X. Esta diferencia en la fotoresina permite crear objetos más altos utilizando el proceso LIGA, ya que pueden ir desde el orden de los micrómetros hasta los milímetros de altura.

Las paredes de las estructuras son suaves y paralelas entre sí. De este modo se pueden crear altas y sofisticadas estructuras, mediante la intensa penetración de rayos X, que al pasar a través de una máscara transfieren la información a una capa de plástico, generalmente polimetil metacrilato (PMMA). La exposición a la radiación, modifica el plástico tal que puede ser removido con una solución química, dejando la estructura plástica con el patrón del enmascarado.

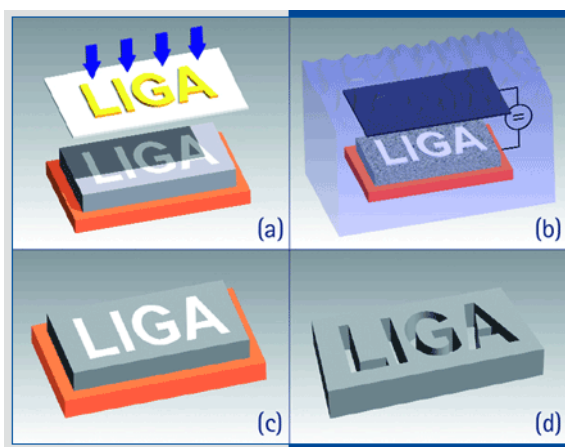


Figura 2.12 Esquema del proceso LIGA a) Exposición a rayos láser b) Plantación de electrones c) Acabado para altura de volumen d) Remoción del sustrato

A pesar de que los procesos anteriormente descritos son los cuatro procesos más popularmente utilizados en la producción de MEMS en laboratorios alrededor del mundo, los investigadores constantemente encuentran nuevas formas de fabricación, más eficientes.

Existen también otros procesos, como el atacado profundo y el micro moldeado, que a pesar de estar basados en procesos como el micromaquinado en volumen y el proceso LIGA respectivamente, aún no han tenido suficiente difusión. O el proceso de plantación electrónica en el que se utiliza un haz de iones para construir de abajo a arriba la estructura, apilando los iones uno encima de otro. Estas áreas de micromaquinado son muy promisorias, pero aún no se han destacado por su flexibilidad con el usuario.

## CAPÍTULO III

### Análisis Teórico Matemático Estático Y Dinámico Del Las Características Del Modelo

#### 3. Justificación teórica

En este capítulo se abarcará la justificación teórica del desempeño estático y dinámico del microespejo para poder validar el modelo que se propone en esta tesis, así como el proceso de diseño del microespejo.

El modelo de un microespejo torsional convencional de dos electrodos, está sostenido por dos micro-vigas torsionales, las cuales están montadas en dos anclajes fijos al sustrato.

Debajo del microespejo, se encuentran los dos electrodos sobre el sustrato. La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático de este dispositivo y la tabla 3.1 explica la notación de su geometría.

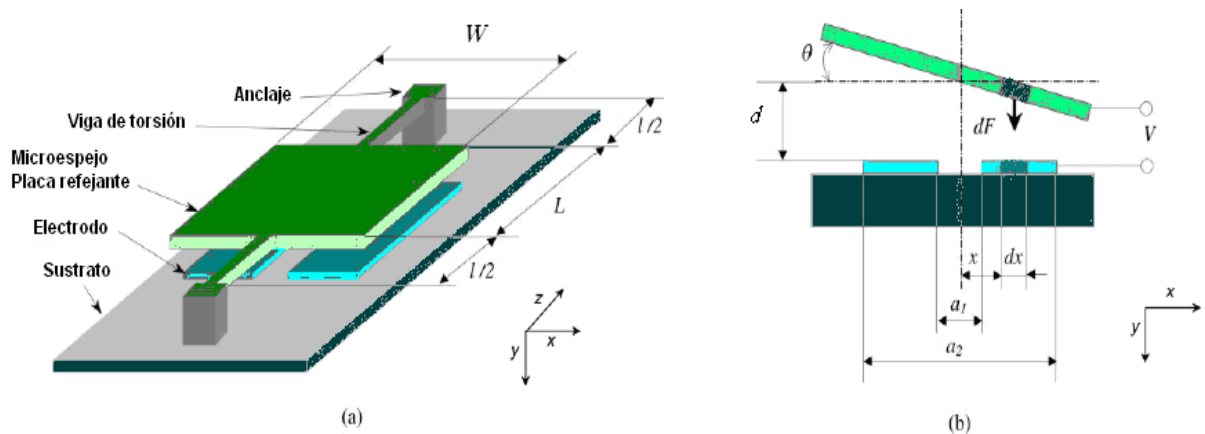


Figura 3.1 Diagrama esquemático de un microespejo torsional: (a) Diagrama en 3D (b) Vista de sección transversal

Básicamente, se puede explicar el funcionamiento del microespejo torsional de la siguiente manera: cuando se aplica un voltaje  $V$  entre el microespejo y uno de los electrodos, la atracción electrostática causa que éste rote sobre su línea central con un desplazamiento angular  $\theta$  (ver figura 3.1 (b)).

La dirección en la que rota el microespejo, depende del electrodo al que se esté aplicando dicha diferencia de potencial, ya que el microespejo girará en una dirección con un electrodo determinado y en dirección inversa con el otro.

Tabla 3.1 Notación de las partes geométricas del microespejo torsional

Parte Geométrica	Notación	Parte Geométrica	Notación
Largo del microespejo	$L$	Ancho de la viga torsional	$w$
Ancho del microespejo	$W$	Grosor de la viga torsional	$t$
Largo efectivo de cada electrodo	$l_e=L$	Largo total de las vigas torsionales	$l$
Ancho de los electrodos	$w_e=a_2-a_1$	Largo de una sola viga torsional	$l/2=l_v$
Grosor de cada electrodo	$t_e$	Parámetro de posición de los electrodos	$a_1=\alpha W$
Espacio entre microespejo y electrodos	$d$	Parámetro de tamaño de los electrodos	$a_2=\beta W$

### 3.1 Análisis Teórico de las Características Estáticas del Microespejo Torsional

Para obtener el modelo estático del sistema torsional del microespejo, se realizarán los análisis del momento torsional electrostático, de la relación de funcionamiento estático entre el voltaje de operación y el ángulo de rotación y del efecto de adhesión momentánea.

#### 3.1.1 El Principio del Capacitor y el Momento Torsional Electroestático.

El microespejo torsional se basa en el principio del capacitor de placas paralelas, en el que dos placas conductoras cualesquiera, separadas por un dieléctrico o por el vacío a una distancia  $d$ , forman un capacitor.

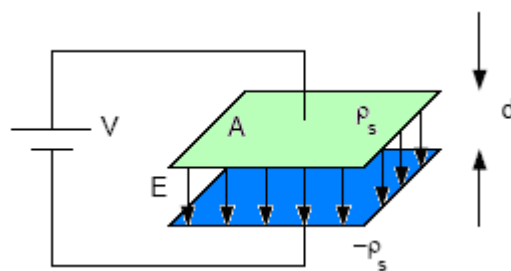


Figura 3.2 Esquema del comportamiento interno en un capacitor.



La carga del capacitor se debe a la transferencia de electrones entre una placa y otra y su comportamiento se ilustra en la figura 3.3. Una de las placas puede estar cargada positivamente y la otra negativamente o viceversa. Para este tipo de capacitor, la capacitancia está dada por:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3.1)$$

Donde  $A$  es el área de de las placas,  $d$  es la separación entre estas y  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del material situado entre las mismas. De igual modo, el campo eléctrico en un capacitor de placas paralelas, con capacitancia  $C$  es:

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.2)$$

Pero como la distancia entre los electrodos y el microespejo es una distancia angular, como se ilustra en la figura 3.2, se define a  $d$  como  $d = a$ , por tanto:

$$E = \frac{V}{a} \quad (3.3)$$

Donde  $a = r\theta = (d / \text{sen}\theta - x)\theta$ , de este modo, el campo eléctrico se define como:

$$E = \frac{V}{(d / \text{sen}\theta - x)\theta} \quad (3.4)$$

Para obtener el momento electrostático en el microespejo, la presión electrostática también es un factor importante y está dada por:

$$P = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon V^2}{((d / \text{sen}\theta - x)\theta)^2} \quad (3.5)$$

Sin embargo, el momento electrostático producido por el incremento de la longitud de la placa  $dx$  localizado en  $x$ , está dado por:

$dM_E = Fdx$  y utilizando la expresión  $F = PWx$ , tenemos que

$$dM_E = PWx dx \quad (3.6)$$

Donde  $W$ , es el ancho de la placa del espejo,  $L$  es su longitud y  $w_e$ ,  $t_e$  y  $l_e$ , son el ancho, el grosor y la longitud del electrodo respectivamente, de este modo, para analizar al microespejo y al electrodo se supuso que ambos dispositivos estuviesen formados de

un número infinito de capacitores infinitesimalmente pequeños, de ancho  $dx$ . Este comportamiento puede verse en la figura 3.3

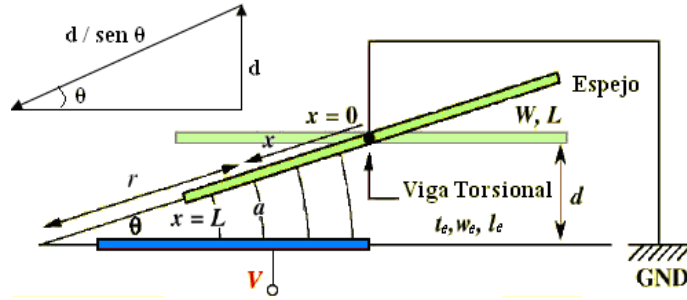


Figura 3.3 Comportamiento angular de la placa del microespejo

De esta manera, el momento torsional electrostático total se obtiene integrando el incremento del momento sobre la longitud de la placa y está dado por  $Me$ :

$$Me = \int dMe = \int PWx dx = \int_{\alpha a/2}^{\beta a/2} x dF \quad (3.7)$$

Donde la fuerza electrostática está determinada por la distancia entre la base del segmento del espejo y el electrodo  $d(x) = d - \theta x$ .

Por otra parte, tanto  $a_1$  como  $a_2$  definen la posición y el tamaño de los electrodos (normalizados por el ancho de la placa del microespejo, tal que tanto  $\alpha$  como  $\beta$  son independientes del tamaño específico del microespejo) y como  $W=L$ , porque la placa del microespejo es cuadrada, se tiene entonces:

$$\begin{aligned} Me &= \int_{\alpha a/2}^{\beta a/2} x dF = \int_{\alpha a/2}^{\beta a/2} x \frac{\epsilon V^2}{2(d - xt\theta)^2} L dx = \frac{\epsilon V^2 L}{2} \int \frac{x}{(d - xt\theta)^2} dx \\ &= \frac{\epsilon V^2 L}{2\theta^2} \left[ \frac{1}{1 - (a_2/2d)\theta} - \frac{1}{1 - (a_1/2d)\theta} + \ln\left(1 - \frac{a_2}{2d}\theta\right) - \ln\left(1 - \frac{a_1}{2d}\theta\right) \right] \quad (3.8) \end{aligned}$$

Donde  $\epsilon$  es la permitividad del aire ( $\epsilon = 8.85$  pF/m), y  $x$  y  $dx$  representan la posición y el ancho del capacitor infinitesimal utilizado, por integración. Por simplicidad, se normaliza el ángulo de rotación  $\theta$ :

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_{max}} \quad (3.9)$$

Donde  $\theta_{max} = 2d/W$  representa el ángulo máximo de rotación.

A pesar de que este valor representa el valor nominal del ángulo de rotación, no significa nada ya que el ángulo máximo de rotación efectivo depende específicamente del arreglo del microespejo. De esta manera, si la ecuación 3.9 se sustituye en la ecuación 3.8:

$$Me = \frac{\epsilon V^2 L}{2\theta_{\max}^2} \frac{1}{\Theta^2} \left[ \frac{1}{1-\beta\theta} - \frac{1}{1-\alpha\theta} + \ln\left(\frac{1-\beta\Theta}{1-\alpha\Theta}\right) \right] \quad (3.10)$$

En esta ecuación, todos los parámetros estructurales, excepto  $\alpha$  y  $\beta$ , contribuyen sólo como coeficientes de  $Me$ . Se observa que el momento torsional electrostático  $Me$ , es proporcional a la longitud  $L$  del microespejo y al cuadrado del voltaje  $V$  de operación. Por lo tanto  $Me$ , es muy sensible a este voltaje.

### 3.1.2 Relación Estática entre el Voltaje de Operación y el Ángulo de Rotación.

Cuando el microespejo es accionado para rotar con un momento torsional electrostático, las vigas que soportan la placa del microespejo se tuercen en un ángulo  $\theta$  en un extremo, es decir, la vigas torsionales presentan un desplazamiento angular el cual generará un momento torsional elástico de restauración torsional  $T_{rT}$  y es linealmente proporcional a su correspondiente desplazamiento en  $\theta$  y puede expresarse como

$$T_{rT} = -S_{\theta}\theta \quad (3.11)$$

Donde  $S_{\theta}$  denota la rigidez de las vigas torsionales y también puede expresarse de la siguiente manera:

$$S_{\theta} = \frac{2GI_p}{l} \quad (3.12)$$

Donde  $G$  es el módulo de corte e  $I_p$  es el momento polar de inercia de la viga torsional y si la estructura está hecha de polisilicio, entonces  $G= 6.6 \times 10^{10}$  Pa.

De este modo, el microespejo se queda quieto únicamente cuando estos momentos torsionales están balanceados (por ejemplo, en condición de equilibrio estático), de tal modo cuando  $Me = T_{rT}$ :

$$V = k_o \left\{ \frac{\Theta^3}{\left[ \frac{1}{1-\beta\Theta} \right] - \left[ \frac{1}{1-\alpha\Theta} \right] + \ln(1-\beta\Theta)/(1-\alpha\Theta)} \right\}^{1/2} \quad (3.13)$$

Donde  $k_o$  representa

$$k_0 = \left[ \frac{2S_0 \theta_{\max}^2}{\epsilon L} \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

La ecuación normalizada del voltaje, representa las relaciones estáticas entre el ángulo de rotación, el voltaje de operación y los parámetros estructurales del microespejo torsional.

El lado derecho de la ecuación 3.13, está compuesta de dos partes. La  $k_0$  representa la combinación de todos los parámetros estructurales (excepto para los parámetros normalizados de los electrodos) del microespejo torsional, y actúa únicamente como coeficiente de sensibilidad. Por esta razón, la relación entre voltaje  $V$  y el ángulo torsional  $\theta$  está determinada principalmente por la otra parte (encerrada entre los corchetes), en la que se involucran los parámetros normalizados de los electrodos (representados por  $\alpha$  y  $\beta$ ).

A partir de este punto de vista, puede decirse que los electrodos determinan el comportamiento del microespejo torsional.

La figura 3.4 muestra una curva típica que representa la relación entre el voltaje de operación y el ángulo de rotación de un microespejo torsional. Inicialmente, el voltaje de operación incrementa en relación con el ángulo.

Sin embargo, cuando el ángulo de rotación alcanza cierto valor de  $\theta_0$  (o equivalentemente con  $\theta_0$ ), el voltaje de operación alcanza su valor máximo  $V_{\max}$ .

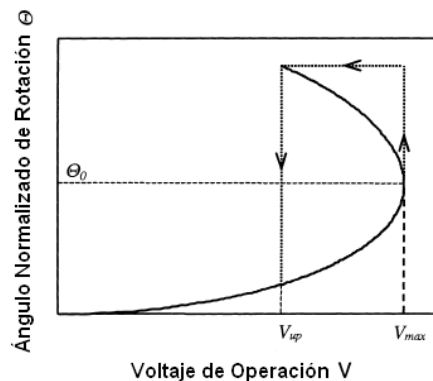


Figura 3.4 Curva de operación típica de la viga de torsión del microespejo.

Este punto crucial en la curva y el ángulo son tomados como punto de caída instantánea y como ángulo de caída instantánea, respectivamente. Por tanto, se requiere de un voltaje muy bajo para mantener el momento torsional de equilibrio para posiciones con ángulos de rotación mayores. De hecho, este tipo de balance no es estable y no puede mantenerse.

Cuando el microespejo rota más allá del ángulo  $\theta_0$ , puede bajar instantáneamente hasta que el borde toque el sustrato. Este es el llamado fenómeno de caída instantánea. Como resultado, después del punto de caída instantánea, la relación  $V-\theta$ , no seguirá la curva definida por la ecuación 3.13, y en su lugar quedará una línea ascendente.

El microespejo no podrá rotar de regreso con una reducción de voltaje, sino hasta que el voltaje de operación sea menor que cierto valor de voltaje de levantamiento  $V_{up}$ . Este fenómeno histerético, es otra de las características del microespejo torsional, que es similar a un circuito de disparo en estado estable y de hecho puede utilizarse para regir y auto bloquear un arreglo de microespejos.

### 3.1.3 Estudio del Efecto Caída Instantánea

Inicialmente, cuando se aplica un voltaje sobre el sistema, la fuerza electrostática sirve para reducir la separación de las placas, es decir, el ángulo de torsión y el desplazamiento vertical  $d-x$  aumentan con el voltaje aplicado requerido.

Sin embargo cuando este voltaje alcanza cierto valor, el ángulo de torsión y el desplazamiento horizontal, alcanzan sus valores críticos. Cuando el voltaje aplicado excede ese valor, la viga torsional colapsa abruptamente con la placa del electrodo.

En este punto de cambio, el ángulo de torsión, del desplazamiento vertical y el voltaje aplicado se refiere como el ángulo de caída instantánea, el desplazamiento de caída instantánea y como voltaje de caída instantánea. Por tanto este es el mejor conocido efecto de caída instantánea.

Una propiedad importante de los microespejos torsionales electrostáticos son sus características de caída instantánea, donde la fuerza/momento electrostático supera a la fuerza/momento mecánico y la placa móvil golpea abruptamente con el electrodo fijo (cuando el voltaje aplicado en la placa móvil se incrementa sobre cierto valor de voltaje).

En otras palabras, la esencia del fenómeno de caída instantánea se debe a la dependencia compartida de la fuerza electrostática sobre la eléctrica y los parámetros mecánicos.

Los parámetros específicos de caída instantánea (voltaje de caída instantánea, ángulo de caída instantánea y el desplazamiento de caída instantánea), están determinados por el diseño de la geometría del microespejo y de los electrodos y juegan un papel importante en el comportamiento del microespejo torsional.

En general, el voltaje de caída instantánea, debe ser lo más bajo posible para prevenir una ruptura eléctrica. Como resultado, es necesario utilizar la torsión efectiva y el modelo de inclinación para optimizar la geometría de la viga torsional y poder reducir el voltaje de caída instantánea.

Como este fenómeno es cortante y sucede sin previo aviso, es indispensable hacer una medición exacta del voltaje de accionamiento requerido para alcanzar dicha inestabilidad, ya que, debido a las cargas opuestas en las placas de los electrodos y del microespejo, se forma entre ambas una fuerza electrostática de atracción.

Esta medición se puede lograr fácilmente utilizando el modelo de las placas paralelas a lo largo de un coeficiente de resorte efectivo de la estructura, como la que puede verse en la figura 3.5, para estimar el voltaje de caída instantánea y el ángulo de caída instantánea.

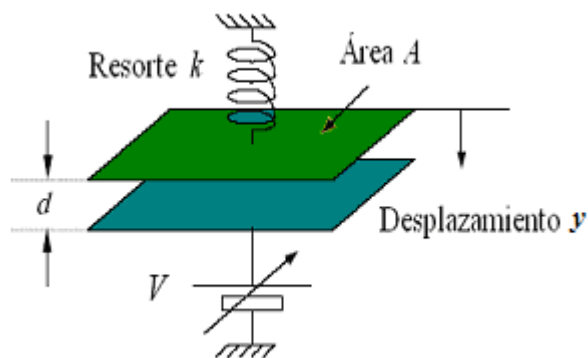


Figura 3.5 Modelo de un capacitor de placas paralelas con coeficiente de resorte

Para derivar la expresión del efecto caída instantánea, comenzamos escribiendo la energía potencial total del sistema, tomando en cuenta que para el microespejo torsional, la distancia entre la placa y el electrodo es  $d(x)=d-\theta x$  y es igual desplazamiento del modelo del capacitor de placas paralelas  $d(x)=d(y)$  en la figura 3.5:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d-y} V^2 + \frac{1}{2} ky^2 \quad (3.15)$$

Donde el primer término es el potencial electrostático del capacitor y del voltaje de fuente y el segundo término se debe a la energía mecánica almacenada en el resorte. La fuerza que actúa en la placa móvil se obtiene derivando esta ecuación:

$$F = -\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{(d-y)^2} V^2 - ky \quad (3.16)$$

En condición de equilibrio, y con voltaje  $V=0$ , la distancia entre las placas del capacitor es  $d(y=0)$ , con  $C = \frac{\epsilon_0 A}{(d-y)}$ ; la fuerza electrostática y la fuerza del resorte se cancelan ( $F=0$ ), y la ecuación de la fuerza electrostática queda:

$$ky = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{(d - y)^2} V^2 \quad (3.17)$$

Cuando se aplica un cierto voltaje  $V$ , la fuerza electrostática causa una reducción de esta distancia y la fuerza del resorte, inducida por el desplazamiento de la placa tiende a contrarrestar los efectos de las fuerzas electrostáticas.

Inicialmente, el ángulo torsional y el desplazamiento vertical incrementa junto con el voltaje aplicado requerido.

La posición de equilibrio de  $z$  de la placa contra el voltaje  $V$ , está dada por:

$$F_{el} + F_{sp} = 0, \text{ donde la fuerza del resorte queda: } F_{sp} = -ky \quad (3.18)$$

El voltaje de caída instantánea se deduce de la ecuación  $F_{el} + F_{sp} = 0$  y puede resolverse por la posición de equilibrio de la placa  $x$  como una función del voltaje aplicado. Para voltajes suficientemente bajos, el ángulo de la masa de prueba exhibe dos soluciones físicas de equilibrio, en las que sólo una es estable (Ver figura 3.6).

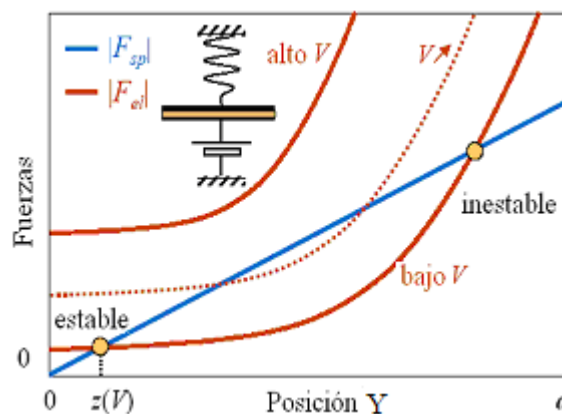


Figura 3.6 Relación del comportamiento entre fuerzas electromecánicas y desplazamiento de la placa

Sin embargo, cuando el voltaje aplicado requerido alcanza cierto valor, el ángulo torsional y el desplazamiento vertical alcanzan su valor crítico, esto es, a altos voltajes no existe la posición de equilibrio y por tanto, las soluciones por encima del desplazamiento de caída instantánea (línea recta en la figura 3.7) resultan ser inestables en lo consecutivo.

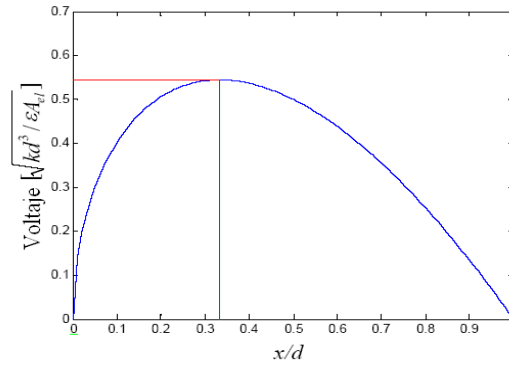


Figura 3.7 Relación de equilibrio entre el desplazamiento de la placa  $x$  y el voltaje  $V$

Una simple expresión de los puntos de caída instantánea, se obtiene derivando la ecuación 3.16 para obtener la rigidez del sistema (ver figuras 3.8 y 3.9):

$$\frac{\delta F}{\delta x} = \frac{\epsilon_0 A}{(d-x)^3} V^2 - k \tag{3.19}$$

Sustituyendo esta en la ecuación 3.17, tenemos la rigidez en el punto de equilibrio:

$$\frac{\delta F}{\delta x} = \frac{2kx}{(d-x)} - k \tag{3.20}$$

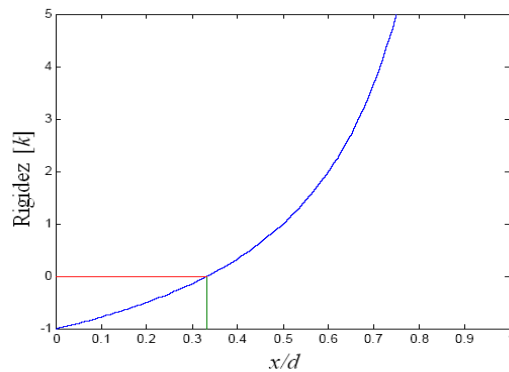


Figura 3.8 La rigidez como función del punto de equilibrio  $x$ . Una rigidez positiva indica un punto de equilibrio inestable

En este punto de cambio, el ángulo torsional, el desplazamiento vertical y el voltaje aplicado se refieren como el ángulo de caída instantánea, el desplazamiento de caída instantánea y el voltaje de caída instantánea.



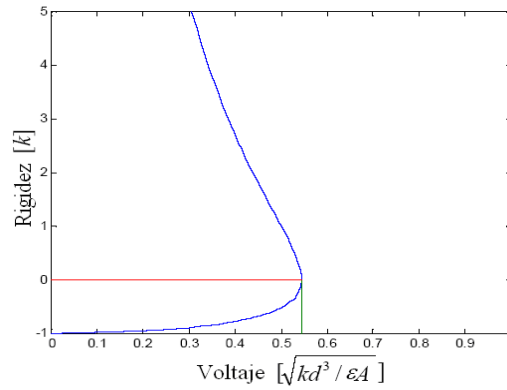


Figura 3.9 La rigidez como función del voltaje V

La fuerza electrostática al ser siempre mayor que la fuerza de resorte, provoca que la placa móvil sea jalada hacia abajo directamente hacia la placa fija. Este es el llamado efecto de caída instantánea y ocurre para un voltaje mayor que el Voltaje de caída instantánea.

El voltaje de caída instantánea se calcula al límite de la región estable:

$$\frac{\epsilon_0 A}{2k} V^2_{pull-in} = \frac{4}{27} d^3 \quad (3.21)$$

$$V_{pull-in} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (3.22)$$

Sin voltaje aplicado, la ecuación 3.19 es simplemente:

$$\frac{\delta F}{\delta x} = -k; \quad (3.23)$$

Donde un pequeño movimiento positivo  $\delta x$  resulta en una fuerza negativa de restauración

$$\frac{\delta F}{\delta x} \delta x = -k \delta x. \quad (3.24)$$

Al ir incrementando el voltaje de alimentación  $V$ , la rigidez se hace menos negativa. El punto de inestabilidad está dado por:

$$\frac{\delta F}{\delta x} = 0, \text{ quedando: } x = \frac{1}{3} d \quad (3.25)$$

Las posiciones de equilibrio estables existen únicamente en las regiones de  $0 < z < d/3$  (ver figura 3.10). Más allá de este punto, la rigidez se vuelve positiva y el sistema inestable: un pequeño movimiento positivo  $\delta x$  resulta en una fuerza positiva tal que incrementa  $x$ .

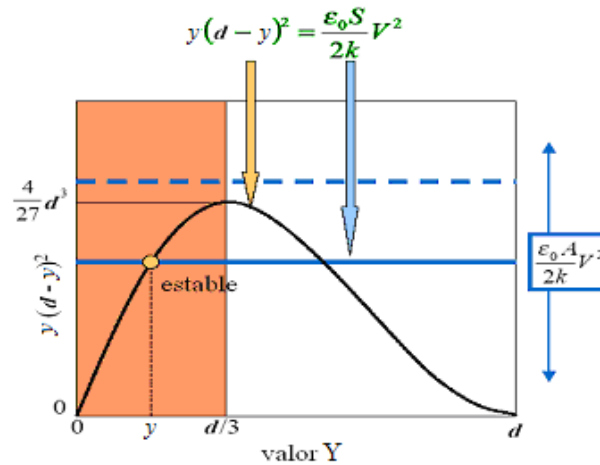


Figura 3.10 Gráfico de la posición de equilibrio

Se tiene que la ecuación para el ángulo de caída instantánea, es independiente del voltaje de caída instantánea y del coeficiente del momento de resorte, por lo tanto el ángulo de caída instantánea es una constante de la estructura. De este modo, el ángulo de caída instantánea puede fijarse en un rango amplio cuando la situación de caída instantánea no ocurre antes de que la franja se cierre.

### 3.1.4 Estudio del Efecto de Adhesión Momentánea

Aunado al efecto de caída instantánea, otro de los problemas fundamentales en la operación de los MEMS es el efecto llamado de adhesión momentánea, que complica significativamente los problemas de control.

Este fenómeno es una falla catastrófica que ocurre cuando la fuerza electrostática entre la masa de prueba y el electrodo aumenta mucho más aprisa que la fuerza de restauración provista por la constante de resorte de la masa suspendida.

Cuando esto ocurre, el sistema se vuelve inestable de controlar a lazo abierto más allá de aproximadamente 1/3 del ancho del alto de esta distancia. Después de este punto, la masa suspendida tocará o golpeará el electrodo de manera abrupta y provocará la adhesión permanente de las partes móviles.

Este fenómeno es una consecuencia del fenómeno de caída instantánea y hace que el espejo actúe en un rango reducido de inclinación. El ángulo de caída instantánea se encuentra entre un tercio y un medio del ángulo de adhesión momentánea (por ejemplo en el ángulo en el que el microespejo hace contacto físico con el electrodo que yace debajo).

Bajo la condición de lazo abierto la regla de control es limitar el ángulo de inclinación del espejo a menos de un tercio del ángulo de adhesión momentánea, para evitar la inestabilidad de caída instantánea.

El efecto de adhesión momentánea resultante en estos transductores, limita su máxima amplitud de operación y puede inclusive dañar a los microespejos, que se atorarán en su posición de máximo desplazamiento.

Debe aclararse que el efecto de adhesión momentánea es causado por mucho desplazamiento, no por mucho voltaje, de este modo puede incrementarse el voltaje operacional por encima del voltaje máximo, mientras se encuentre dentro del rango de desplazamiento aceptable.

Como el ángulo de caída instantánea  $\Theta_0$ , determina el rango angular sobre el cual el microespejo puede funcionar suavemente, representa un parámetro importante en aplicaciones donde el microespejo opera con ángulos continuos.

El voltaje máximo de operación  $V_{max}$  es otro parámetro importante de considerar en aplicaciones prácticas. Para que sea compatible con componentes de circuitos integrados los cuales operan a 5V normalmente, y para prevenir un corte eléctrico, el valor máximo del voltaje de operación deberá ser lo más bajo posible.

Teóricamente, el punto de caída instantánea puede obtenerse resolviendo  $dV/d\Theta=0$ . Así, la relación entre el ángulo  $\Theta_0$  de caída instantánea y los parámetros de los electrodos  $\alpha$  y  $\beta$ , están determinados por:

$$\frac{3}{1-\beta\Theta_0} - \frac{3}{1-\alpha\Theta_0} - \frac{\beta^2\Theta_0^2}{(1-\beta\Theta_0)^2} + \frac{\alpha^2\Theta_0^2}{(1-\alpha\Theta_0)^2} + 3\ln\left(\frac{1-\beta\Theta_0}{1-\alpha\Theta_0}\right) = 0 \quad (3.26)$$

Donde  $\ln$  representa el logaritmo natural. Esta ecuación no tiene una solución analítica excepto cuando  $\alpha=0$ . Asumiendo que  $\alpha=0$ :

$$\beta\Theta_0 = 0.4404, \quad (\alpha = 0, 0 \leq \beta, \Theta_0 \leq 1) \quad (3.27)$$

Aquí, 0.4404 es la constante universal para todos los microespejos torsionales accionados electrostáticamente. Esta ecuación revela que el mecanismo intrínseco del efecto de caída instantánea, está influenciado por las dimensiones del electrodo. Esto prueba nuevamente que “los electrodos determinan el comportamiento del microespejo torsional”.

La ecuación 3.27 indica claramente cómo obtener un ángulo de caída instantánea seleccionando el tamaño de los electrodos, lo cual es muy útil para diseñar microespejos torsionales. Significativamente, se puede derivar el microespejo torsional sin caída instantánea. De la ecuación 3.27, si  $\beta \leq 0.4404$ ,  $\Theta_0=1$  (Figura 3.11).

Esto quiere decir, que cuando el tamaño normalizado del electrodo es menor o igual que 0.4404, el efecto de caída instantánea tiene lugar únicamente cuando el microespejo torsional rota hasta su ángulo máximo y hace contacto con el sustrato. Si estos son equivalentes, entonces no existe caída instantánea. Se ha medido y verificado este valor para ángulos de caída instantánea entre 0.44-0.46.

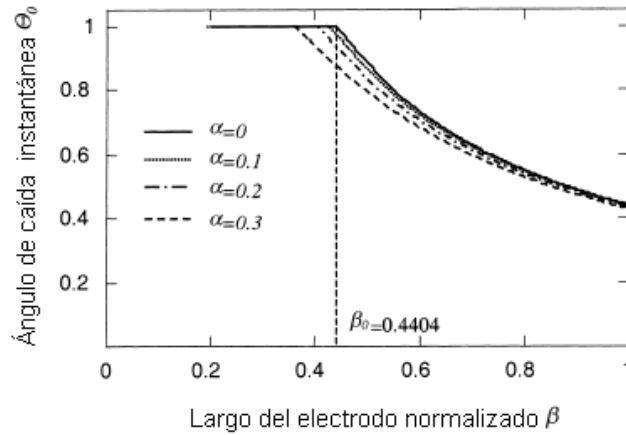


Figura 3.11 Ángulo de caída instantánea vs tamaño del electrodo

La ecuación 3.27 se ha basado en la condición que  $\alpha=0$ . Para casos en los que  $\alpha \neq 0$ , las relaciones de  $\beta$  y  $\Theta_0$ , se obtienen numéricamente resolviendo la ecuación 3.26. La figura 3.11 muestra las curvas correspondientes a  $\Theta_0$  contra  $\beta$  cuando  $\alpha=0.3$ . Queda claro que la curva de  $\alpha=0.2$  no es significativamente distinta de la de  $\alpha=0$ . En otras palabras, la ecuación 3.27 es aproximadamente válida para todos aquellos casos en los que  $\alpha \leq 0.3$ . Sustituyendo la ecuación 3.27 en la ecuación 3.13, el voltaje máximo de operación  $V_{max}$ , se expresa como:

$$V_{max} = 2.2009k_0\Theta_0^{-3/2} \quad (3.28)$$

$$V_{max} = 0.6432k_0\beta^{-3/2} \quad (3.29)$$

Estas dos ecuaciones combinadas con la ecuación 3.27, ilustran las relaciones directas entre el voltaje de operación, el ángulo de caída instantánea y el tamaño de los electrodos, y son muy útiles al momento de diseñar microespejos torsionales.

### 3.2 Análisis Teórico de las Características Dinámicas del Microespejo Torsional

Es muy importante entender el comportamiento dinámico del microespejo torsional para poder diseñar un nuevo microespejo y poder controlar sus movimientos. Por lo tanto, es necesario considerar el dominio físico de acoplamiento entre lo eléctrico y lo

mecánico y el movimiento de acoplamiento no lineal entre torsión e inclinación en el modelo dinámico del microespejo torsional.

Esto, debido a que algunos experimentos previos indican que el comportamiento dinámico del microespejo puede cambiar significativamente bajo diferentes presiones de aire, lo que conlleva a numerosas complicaciones en el efecto de amortiguamiento.

En estudios previos, se han realizado algunos análisis modales en microespejos torsionales para determinar el comportamiento dinámico de la placa de los microespejos, los cuales revelaron que la deformación de la placa del microespejo es muy pequeña y que el desplazamiento vertical del microespejo se atribuye principalmente a la deflexión de las microvigas. Por esta razón, el microespejo puede tomarse como un cuerpo rígido.

### 3.2.1 Doblez de Las Vigas Torsionales debido a la Masa Del Microespejo

Como condición típica del sistema del microespejo torsional propuesto, la masa central (la placa del microespejo) es mucho más ancha y/o más gruesa que las vigas que la sostienen, de modo que si existe algún tipo de doblez en la masa de la placa del microespejo, éste se considera insignificante.

Si la carga de la estructura viga torsional-masa de la placa es su propio peso en la dirección  $y$ , el desplazamiento de la masa se asemeja al movimiento de un pistón debido a la simetría en la estructura en las direcciones  $x$  y  $z$ . Por lo tanto, se puede considerar únicamente la mitad de la estructura, y para la viga el desplazamiento, de acuerdo con la figura 3.12 es:

$$-EIv''(z) = \frac{Mg}{2}z - m_0 - \frac{\rho w t g z^2}{2} \quad (3.30)$$

Donde  $E$  representa al módulo de Young,  $I = wt^3/12$  y  $v(z)$  es una función de desplazamiento, cuya segunda derivada representa el recíproco del radio de curvatura de una curva  $v(z)$ , matemáticamente, esto es:

$$\frac{1}{r} = |v''(z)|$$

Además,  $g$  representa la fuerza de gravedad,  $\rho$  es la resistividad del material,  $m_0$  es el momento de inclinación restrictivo a determinarse y  $M$  es la masa total de la estructura viga-placa que a su vez se define por:

$$M = 2(P_M - l_v)Wt\rho + 2wtl_v\rho \quad (3.31)$$

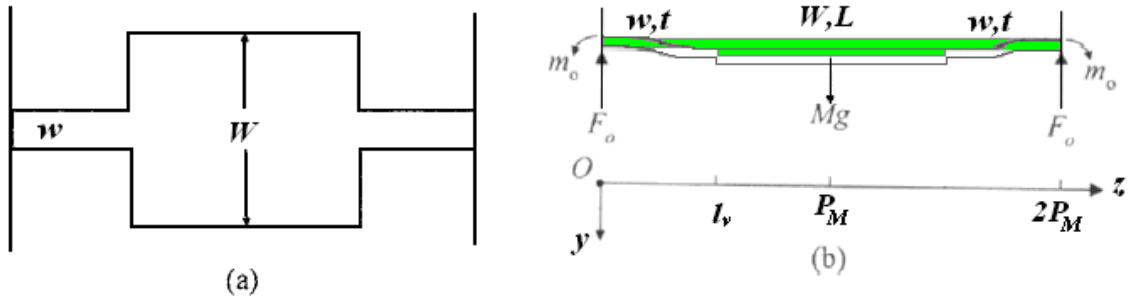


Figura 3.12 Esquema de la estructura (a) vista superior (b) vista transversal

Donde  $P_M = (l + L)/2$ , que es el punto medio del largo total de la estructura del microespejo torsional. Si la estructura está hecha de silicio, entonces  $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$ .

Bajo la condición de que la masa de las vigas es mucho menor que la masa central de la placa del microespejo, la ecuación 3.30 puede simplificarse como:

$$-EIv''(z) = \frac{Mg}{2}z - m_0 \quad (3.32)$$

Las condiciones de frontera para la ecuación son:

$$v(0) = 0, \quad v'(0) = 0, \quad v'(l_v) = 0, \quad \text{y} \quad v''\left(\frac{1}{2}l_v\right) = 0 \quad (3.33)$$

A partir de las ecuaciones 3.32 y 3.33 tenemos que:

$$m_0 = \frac{1}{4}Mgl_v \quad (3.34)$$

Por lo tanto la tensión en la parte superior de la viga es

$$T(z) = 3\frac{Mg}{wt^2}\left(\frac{1}{2}l_v - z\right) \quad (3.35)$$

De tal modo, las tensiones sobre la superficie de las vigas varían linealmente desde un máximo positivo en un extremo hasta un máximo negativo en el otro extremo, y los valores para ambos máximos son los mismos:

$$T_{\max} = \frac{3l_v}{2wt^2}Mg \quad (3.36)$$

Por lo tanto, el desplazamiento de cada viga es:

$$v(z) = \frac{Mg}{Ewt^3} z^2 \left( \frac{3}{2} l_v - z \right) \quad (3.37)$$

El desplazamiento de la masa central es

$$v(l_v) = \frac{Mg}{2Ewt^3} l_v^3 \quad (3.38)$$

Y si las vigas se consideran como resortes, la constante de ese resorte es:

$$k = \frac{2Ewt^3}{l_v^3} \quad (3.39)$$

### 3.2.2 Desplazamiento Angular de las Vigas Torsionales.

Para una viga torsional con cruce transversal rectangular como las que soportan la placa del microespejo, el análisis de su constante de torsión es un poco complicado. De tal modo que la expresión teórica para  $k_\phi$  es:

$$k_\phi = \frac{1}{3P_M} Ga^3b \left( 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{a}{b} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi b}{2a} \right) = \frac{k_1 Ga^3b}{P_M} \quad (3.40)$$

donde a y b son los lados de la sección rectangular (largo y ancho, donde  $b > a$ , por ejemplo), como se muestra en la figura 3.13 respectivamente y el coeficiente  $k_1$  es:

$$k_1 = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{a}{b} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi b}{2a} \right) \quad (3.41)$$

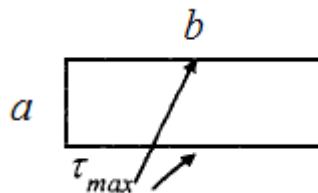


Figura 3.13 Sección transversal rectangular de una viga torsional

Para  $a=b$  tenemos que  $k_\phi = 0.141$ . Algunos valores posibles de  $k_1$  se proporcionan en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Factores para relaciones torsionales

b/a	1.0	1.2	1.5	3.0	3.5	3.0	4.0	5.0	10	∞
k	0.675	0.759	0.848	0.930	0.968	0.985	0.997	0.999	1.000	1.000
k <sub>1</sub>	0.141	0.166	0.196	0.229	0.249	0.263	0.281	0.291	0.312	0.333
k <sub>2</sub>	0.208	0.219	0.231	0.246	0.258	0.267	0.282	0.291	0.312	0.333

Entonces, un momento torsional actuará sobre las barras torsionales cuando la placa del microespejo sea sometida a una aceleración (o gravedad) en su dirección normal y las vigas de torsión se torcerán por ese momento. Como el ángulo de torsión es proporcional al momento de torsión que es también proporcional a la aceleración, el ángulo de torsión puede utilizarse para medir la aceleración.

### 3.2.3 Frecuencia de Vibración para la Estructura del Microespejo.

Para una estructura como la del microespejo en la que una masa (la placa del microespejo) es soportada por dos vigas (ver figura 3.14), si la masa de la placa entre las vigas y la inclinación entre la masa central total son despreciables, la estructura puede considerarse como un sistema masa-resorte y la constante de resorte estará dada por la ecuación 3.39.

Por lo tanto, la frecuencia de vibración de la estructura está determinada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{2Ewt^3}{Ml_v^3}} \quad (3.42)$$

Donde  $M = 2\rho Wt(P_M - l_v)$  es la masa de la placa central.

### 3.2.4 Frecuencia de Vibración de la Viga Torsional

Retomando el concepto y la ecuación 3.11 del momento elástico de restauración torsional generado por las vigas torsionales, si el momento de inercia para la rotación de la masa es  $I_\theta$ , por la segunda ley de Newton sobre rotación, se puede la ecuación diferencial

$$I_\theta \ddot{\theta} + k_\theta \theta = 0 \quad (3.43)$$

La solución de la ecuación anterior es una oscilación angular donde  $\theta = \Phi \text{sen}(\omega t + \alpha)$  y la frecuencia radial de vibración es:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_\theta}{I_\theta}} \quad (3.44)$$



Para calcular esta frecuencia y la frecuencia en Hz, podemos utilizar la expresión del momento de inercia para la rotación de la placa:

$$I_{\theta} = \int_{-P_M/2}^{P_M/2} \rho W t z^2 dz \quad (3.45)$$

La constante elástica resultante de las dos vigas torsionales es:

$$k_{\theta} = \frac{2Gk_1 w t^3}{l} \quad (3.46)$$

De este modo, de la tabla 3.2 se tiene que  $k_1=0.141$ .

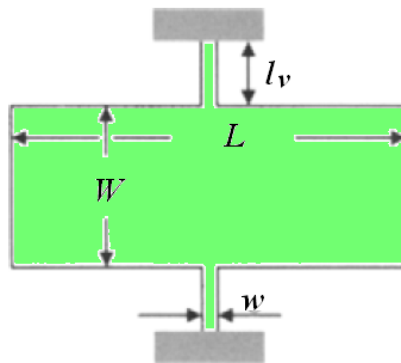


Figura 3.14 Parámetros de la estructura para realizar un análisis de la frecuencia

### 3.2.5 Diferentes Fuerzas de Amortiguamiento para el Microespejo Torsional

El amortiguamiento es un factor destructivo para mantener vibraciones, por lo tanto generalmente se realizan mediciones para reducirlo o aumentarlo, tal que permanezcan las vibraciones con un mínimo de energía. Sin embargo en muchos otros casos, se introduce amortiguamiento para reducir la oscilación del sistema.

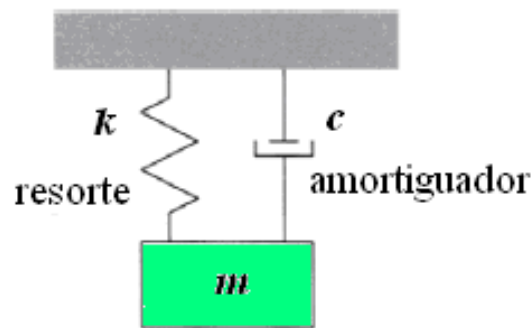


Figura 3.15 Modelo simplificado para un modelo vibracional con amortiguamiento

De esta manera, la vibración de un sistema real siempre se resiste por la acción de fuerzas de disipación, tales como la viscosidad del aire, la fricción, transmisión acústica, disipación interna, etc. El sistema entonces, realiza un trabajo positivo.

La energía para el trabajo es sustraída de la energía de vibración y usualmente se convierte en energía térmica. Por lo tanto, el amortiguamiento es el proceso en el cual se toma energía de las vibraciones de un sistema.

Generalmente el amortiguamiento es inevitable en cualquier sistema. Una causa común de amortiguamiento es la viscosidad del fluido que rodea al sistema, como el aire. El fluido ejerce fuerzas viscosas sobre el objeto móvil y se opone al movimiento de éste a través del fluido.

Como primera aproximación se tiene que la fuerza de amortiguamiento  $F_d$ , es proporcional a la velocidad de movimiento:

$$F_d = -c\dot{x} \quad (3.47)$$

Donde  $c$  es el llamado coeficiente de amortiguamiento y su signo negativo indica que la fuerza se opone a la dirección de movimiento.

### 3.2.6 Amortiguamiento de la Vibración oscilatoria del microespejo.

El amortiguamiento del sistema del microespejo torsional puede representarse como el sistema de amortiguamiento que se muestra en la figura 3.15, cuya ecuación diferencial de segundo orden para el movimiento es:

$$m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} \quad (3.48)$$

Donde  $m$  es la masa del sistema y  $c$  es el coeficiente de la fuerza de amortiguamiento. O también se tiene que

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (3.49)$$

Haciendo que  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  y que  $n = \frac{c}{2m}$ , se tiene que

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3.50)$$

Donde  $\omega_0$  es la frecuencia radial de vibración del sistema si es que no hay amortiguamiento y  $n$  es el llamado coeficiente de amortiguamiento. Haciendo que  $x = Ae^{\lambda t}$ , tenemos:

$$\lambda^2 + 2n\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (3.51)$$

La solución de la ecuación es:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - \omega_0^2} \quad (3.52)$$

El comportamiento del sistema puede discutirse de acuerdo a la razón entre  $n$  y  $\omega_0$ . La razón  $\zeta = n / \omega_0$  es conocida como la razón de amortiguamiento del sistema.

**a) Sistema del microespejo con Sub-Amortiguamiento:**

Si  $n < \omega_0$ , es decir  $\zeta < 1$  tenemos:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm i\sqrt{(\omega_0^2 - n^2)} \quad (3.53)$$

Por lo tanto la solución a la ecuación 3.50 es:

$$x = Ae^{-nt} \text{sen}(\sqrt{(\omega_0^2 - n^2)t + \alpha}) \quad (3.54)$$

Lo que indica que el sistema tendrá una oscilación que será distinta de la vibración libre, por lo que:

1) La frecuencia de vibración es  $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - n^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$ , que es menor que la frecuencia de vibración libre  $\omega_0$ , y

2) La amplitud de la vibración decae exponencialmente con el tiempo.

**b) Sistema del microespejo con Amortiguamiento Viscoso:**

Si  $n > \omega_0$ , es decir  $\zeta > 1$  tenemos:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm \sqrt{(n^2 - \omega_0^2)} \quad (3.55) \quad \text{y} \quad x = e^{-nt} \left( c_1 e^{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}t} + c_2 e^{-\sqrt{n^2 - \omega_0^2}t} \right) \quad (3.56)$$

Como no hay oscilación en el desplazamiento, la masa regresa a su posición balanceada lentamente.

**c) Sistema del microespejo con Sobre-Amortiguamiento:**

Si  $n = \omega_0$ , es decir  $\zeta = 1$ , tenemos que  $\lambda_1 = \lambda_2 = -n = -\omega_0$  y la solución especial para la ecuación 3.50 es  $x_1(t) = c_1 e^{-nt}$ . Asumiendo una solución general de  $x = A(t)x_1(t)$  y

sustituyéndola en la ecuación 3.50, tenemos  $d^2A/dt^2 = 0$ . Por lo tanto, la solución general de la ecuación 3.50 es:

$$x(t) = c_1 e^{-\zeta t} (c_2 t + c_3) \quad (3.57)$$

El resultado indica que no hay oscilación en el caso de sobre-amortiguamiento, pero el tiempo que se lleva en desplazamiento para que el amortiguamiento sea virtualmente cero, es mínimo. La figura 3.16 muestra las relaciones  $x(t)$  para las tres condiciones de amortiguamiento.

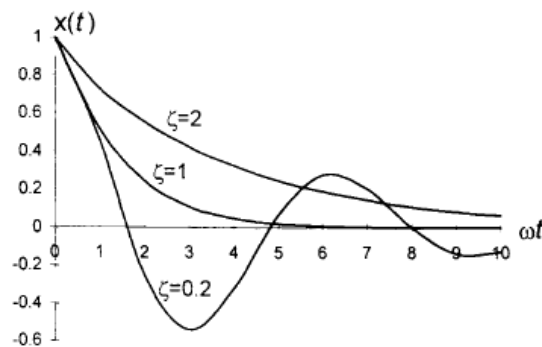


Figura 3.16 Atenuación de la amplitud en sistemas con diferente razón de amortiguamiento

### 3.2.7 Respuesta del Microespejo Torsional a una Fuerza Escalón

Para el sistema del microespejo que es un sistema masa-resorte, la posición de equilibrio de la masa es  $x = 0$ . Con una fuerza constante  $F_0$  actuando sobre la masa, la posición de equilibrio es  $x_0 = F_0 / k$ .

Ahora debemos considerar el tiempo de respuesta del sistema a una fuerza escalón  $F_0$ . Cuando la fuerza se aplica sobre la masa a un tiempo  $t=0$ , la masa se mueve desde su posición original hacia su nueva posición de equilibrio  $x_0 = F_0 / k$ .

Si el efecto de amortiguamiento es despreciable, el sistema poseerá una energía total de  $E = x_0 F_0$  cuando la masa llegue a  $x_0$ , dado el trabajo hecho por la fuerza.

Como el potencial de energía en ésta condición es  $\frac{kx_0^2}{2} = \frac{x_0 F_0}{2}$ , la masa debe tener una fuerza cinética de  $\frac{x_0 F_0}{2}$  en  $x_0$ . Esto significa que la masa se moverá hasta después de haber pasado por  $x_0$  hasta que llegue a  $x'$ , donde el trabajo hecho por la fuerza aplicada iguale a la energía potencial elástica.

$$F_0 x' = \frac{1}{2} kx'^2 \quad (3.58)$$

Como  $x' = 2x_0$  no es una posición de equilibrio, la masa se moverá de nuevo hacia  $x = 0$ . En este sentido, la masa oscila entre 0 y  $2x_0$ .

Al considerar el efecto de amortiguamiento, la oscilación terminará y la masa finalmente quedará fija en  $x = x_0$ , cuando el exceso de energía sea consumida completamente por el amortiguamiento. Por lo tanto, se tiene como resultado que la respuesta del sistema a la fuerza escalón es altamente dependiente del amortiguamiento.

El proceso puede describirse por la ecuación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \quad (3.59)$$

Como  $F_0 = kx_0$ , tenemos

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k(x - x_0) = 0 \quad (3.60)$$

Haciendo que  $x_1 = x - x_0$ , tenemos la ecuación diferencial para  $x_1$

$$m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + kx_1 = 0 \quad (3.61)$$

con las condiciones iniciales

$$x_1|_{t=0} = -x_0, \dot{x}_1|_{t=0} = 0 \quad (3.62)$$

Por lo tanto, la solución a la ecuación 3.50 es aplicable a la ecuación 3.61 y las condiciones iniciales mostradas en la ecuación 3.62 pueden usarse para determinar las constantes en las soluciones. El análisis arroja los siguientes resultados:

**a) Condiciones de Sub-Amortiguamiento, con  $\zeta < 1$ .**

En esta condición, el sistema oscila antes que se estabilice. La expresión para  $x(t)$  es:

$$x = x_0 \left( 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_0 t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \operatorname{sen}(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_0 t + \alpha) \right) \quad (3.63)$$

donde  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  y  $\alpha = \text{sen}^{-1} \sqrt{1 - \zeta^2}$ .

**b) Condición de Sobre-Amortiguamiento,  $\zeta = 1$**

En esta condición, el sistema se mueve hacia su nueva posición de equilibrio sin oscilar. La dependencia de la posición  $x$  en el tiempo es:

$$x = x_0(1 - (1 - \omega_0 t)e^{-\omega_0 t}) \tag{3.64}$$

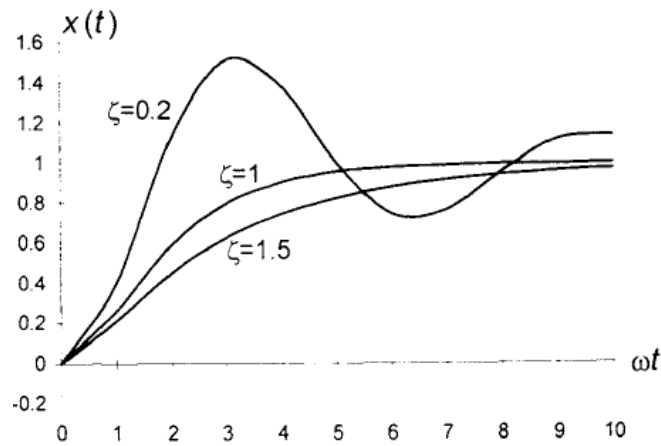


Figura 3.17 Respuesta a una fuerza escalón para diferentes razones de amortiguamiento.

**c) Condiciones de Amortiguamiento Viscoso**

En esta condición el sistema alcanza una nueva posición de equilibrio lentamente. La expresión de  $x(t)$  es:

$$x = x_0 \left( 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_0 t} + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_0 t} \right) \tag{3.65}$$

Por ejemplo, las curvas para las tres condiciones de amortiguamiento son las que se muestran en la figura 3.17.

**3.3 Acoplamiento Dinámico Entre Los Efectos De Deflexión Y Torsión.**

Como se mencionó en el punto 3.1, cuando el voltaje de polarización,  $V$ , se aplica al microespejo, éste rota con un desplazamiento angular  $\theta$ , pero también se ha mencionado que sufre un desplazamiento vertical en la dirección de  $y$ , debido a la fuerza, a su propio peso y al momento torsional electrostático, lo cual puede apreciarse en la figura 3.18.

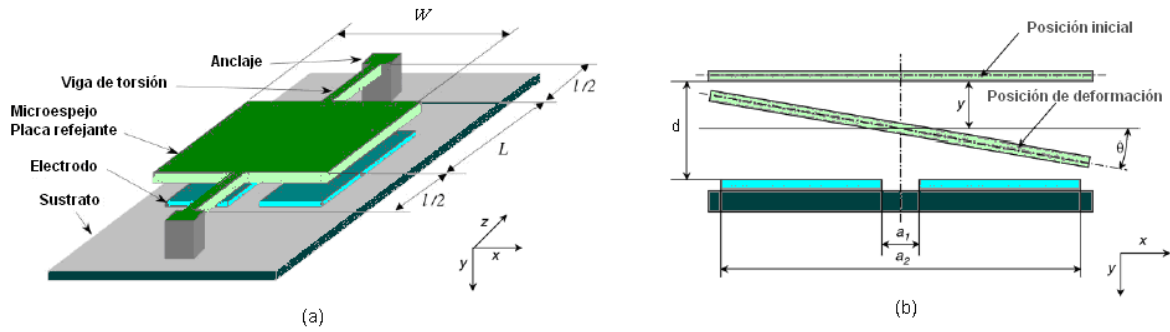


Figura 3.18 (a) Diagrama en 3D (b) Vista de sección transversal con deformación en y.

Como se vio anteriormente, el momento elástico de restauración torsional, en la ecuación 3.11 y ahora la fuerza de restauración de deflexión elástica  $F_{rB}$ , que se presenta en la dirección  $y$ , son proporcionales a su desplazamiento. La de la fuerza puede expresarse como:

$$F_{rB} = S_y y \quad (3.66)$$

Donde  $S_y$  representa rigidez de deflexión de las vigas torsionales y también puede expresarse de la siguiente manera:

$$S_y = \frac{24E_y I}{l^3} \quad (3.67)$$

Donde  $E_y$  es el módulo de Young e  $I$  es la sección de cruce.

Sin embargo, dado que el microespejo puede tratarse como si fuera un cuerpo rígido y que la fuerza y el momento torsional debidos al peso del microespejo pueden ser despreciados, si suponemos un amortiguamiento viscoso, la resistencia al momento torsional  $T_{dT}$ , es linealmente proporcional a la velocidad angular y la fuerza de resistencia de deflexión  $F_{dB}$ , es linealmente proporcional a la velocidad de deflexión, esto es:

$$T_{dT} = -C_\theta \frac{d\theta}{dt} \quad (3.68) \quad \text{y} \quad F_{dB} = -c \frac{dy}{dt} \quad (3.69)$$

Donde  $C_\theta$  y  $c$  son los factores de amortiguamiento de los movimientos torsionales y de deflexión, respectivamente.

Así, tenemos que las ecuaciones dinámicas clásicas del microespejo, están dadas por

$$\begin{cases} My + c\dot{y} + K_y y = \Gamma_{eB} \\ I_\theta \ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K_\theta \theta = \Gamma_{eT} \end{cases} \quad (3.70)$$

Donde  $M$  es la masa del microespejo,  $I_\theta$  es el momento de inercia en el eje de rotación,  $\Gamma_{eB}$  es la fuerza electrostática que actúa sobre la masa y  $\Gamma_{eT}$  es el momento torsional debido a la diferencia de potencial aplicada.

En general, se puede ignorar la no linealidad de la rigidez torsional del microespejo. Retomando el modelo del capacitor de placas paralelas,  $\Gamma_{eb}$  y  $\Gamma_{eT}$ , se pueden expresar como:

$$\Gamma_{eB} = \frac{L\epsilon V^2}{2d\theta} \left[ \frac{1}{1-(y/d)-(a_2\theta/2d)} - \frac{1}{1-(y/d)-(a_1\theta/2d)} \right] \quad (3.71)$$

$$\Gamma_{eT} = \frac{L\epsilon V^2}{2d\theta^2} \left[ \frac{1-(y/d)}{1-(y/d)-(a_2\theta/2d)} - \frac{1-(y/d)}{1-(y/d)-(a_1\theta/2d)} + \ln \left( \frac{1-(y/d)-(a_2\theta/2d)}{1-(y/d)-(a_1\theta/2d)} \right) \right] \quad (3.72)$$

Al introducir los parámetros normalizados:

$$a_1 = \alpha a, \quad a_2 = \beta a, \quad \delta = \frac{y}{d}, \quad \phi = \frac{a\theta}{2d}, \quad \tau = \omega_0 t, \quad \omega_0^2 = \frac{K_\theta}{I_\theta}, \quad \omega_1^2 = \frac{K_y}{M}, \quad R_1 = \frac{c}{M\omega_0}, \quad R_2 = \frac{C_\theta}{I_\theta\omega_0}$$

y  $\lambda_{br} = \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} = \frac{K_y}{M} \frac{I_\theta}{K_\theta}$  y sustituyendo las ecuaciones 3.71 y 3.72 en la ecuación 3.70, las ecuaciones dinámicas quedan de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \frac{d^2\delta}{d\tau^2} + R_1 \frac{d\delta}{d\tau} + \lambda_{br}\delta = \frac{B_1 V^2}{\phi} \left[ \frac{1}{1-\delta-\beta\phi} - \frac{1}{1-\delta-\alpha\phi} \right] \\ \frac{d^2\phi}{d\tau^2} + R_2 \frac{d\phi}{d\tau} + \phi = \frac{B_2 V^2}{\phi} \left[ \frac{1}{1-\delta-\beta\phi} - \frac{1}{1-\delta-\alpha\phi} + \ln \left( \frac{1-\delta-\beta\phi}{1-\delta-\alpha\phi} \right) \right] \end{cases} \quad (3.73)$$

$$\text{Donde} \quad B_1 = \frac{L\epsilon W}{3M\omega_0^2 d^3} \quad \text{y} \quad B_2 = \frac{L\epsilon W^3}{16K_\theta d^3}.$$

La ecuación 3.73 representa el conjunto de ecuaciones no lineales del acoplamiento dinámico de la torsión y deflexión del microespejo.

Para prevenir un sobrecarga por cálculos, cuando  $\phi \rightarrow 0$ , los términos con un  $\phi$  variable, en el lado derecho de la ecuación 3.73, puede sustituirse por sus límites correspondientes

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{1}{\phi} \left[ \frac{1}{1-\delta-\beta\phi} - \frac{1}{1-\delta-\alpha\phi} \right] = \frac{\beta-\alpha}{(1-\delta)^2} \quad (3.74)$$



$$\lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{1}{\phi^2} \left[ \frac{1-\delta}{1-\delta-\beta\phi} - \frac{1-\delta}{1-\delta-\alpha\phi} + \ln \left( \frac{1-\delta-\beta\phi}{1-\delta-\alpha\phi} \right) \right] = \frac{\beta^2 - \alpha^2}{2(1-\delta)^2} \quad (3.75)$$

Haciendo que  $x_1 = \delta$ ,  $x_2 = d\delta/d\tau$ ,  $x_3 = \phi$  y que  $x_4 = d\phi/d\tau$ , la ecuación 3.73 se vuelve un arreglo de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\begin{cases} x_1' = x_2 \\ x_2' = -R_1 x_2 - \lambda_{br} x_1 + \frac{B_1 V^2}{x_3} \left[ \frac{1}{1-x_1-\beta x_3} - \frac{1}{1-x_1-\alpha x_3} \right] \\ x_3' = x_4 \\ x_4' = -R_2 x_4 - x_3 + \frac{B_2 V^2}{x_3^2} \left[ \frac{1-x_1}{1-x_1-\beta x_3} - \frac{1-x_1}{1-x_1-\alpha x_3} + \ln \left( \frac{1-x_1-\beta x_3}{1-x_1-\alpha x_3} \right) \right] \end{cases} \quad (3.76)$$

### 3.3.1 Respuesta A Una Fuerza Escalón Del Modelo Con Acoplamiento Dinámico

Como se explicó anteriormente, la respuesta a una fuerza escalón del microespejo es una característica muy importante para aplicaciones reales. El modelo de acoplamiento dinámico del microespejo, es de gran ayuda para analizarlos comportamientos con excitación de escalón.

#### 3.3.1.1 Respuesta A Una Fuerza Escalón Sin Amortiguamiento.

Si se asume que el amortiguamiento puede despreciarse, la ecuación 3.76,  $R_1=0$  y  $R_2=0$ , puede utilizarse para calcular la respuesta escalón del microespejo sin el efecto de amortiguamiento. Mejor aún, en el caso del modelo no acoplado, el efecto de deflexión es despreciado y la ecuación 3.73 puede simplificarse de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\phi}{d\tau^2} + R_2 \frac{d\phi}{d\tau} + \phi = \frac{B_2 V^2}{\phi^2} \left[ \frac{1}{1-\beta\phi} - \frac{1}{1-\alpha\phi} + \ln \left( \frac{1-\beta\phi}{1-\alpha\phi} \right) \right] \quad (3.77)$$

La ecuación 3.77, puede re-escribirse como un arreglo de ecuaciones diferenciales de primer orden, sin el efecto de amortiguamiento:

$$\begin{cases} x_3' = x_4 \\ x_4' = -x_3 + \frac{B_2 V^2}{x_3^2} \left[ \frac{1}{1-\beta x_3} - \frac{1}{1-\alpha x_3} + \ln \left( \frac{1-\beta x_3}{1-\alpha x_3} \right) \right] \end{cases} \quad (3.78)$$

Para simular la respuesta del microespejo, los valores iniciales de todas las variables, deben ser prefijados a cero, a saber:

$$[x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0] = [0, 0, 0, 0]$$

De este modo se puede afirmar que la amplitud y el periodo de la respuesta escalón variarán dependiendo del voltaje aplicado, respectivamente. Esto es, la amplitud y el periodo de la respuesta aumentarán conforme el voltaje aplicado incrementa.

La razón por la que tanto la amplitud como el periodo incrementen cuando el voltaje aplicado aumenta, se debe a la no linealidad del sistema.

En un sistema lineal, sólo la amplitud aumenta con el incremento de la magnitud de la carga. Para un sistema lineal, la posición de equilibrio estático es exactamente la media de la respuesta dinámica. Sin embargo, para el microespejo con características no lineales, esto es falso.

Esto significa que al igualar los momentos torsionales y las fuerzas, y al resolver las ecuaciones acopladas, la curva de transferencia de ángulo y voltaje del microespejo, accionado por uno solo de los electrodos, se obtiene como se indica en la figura 3.19.

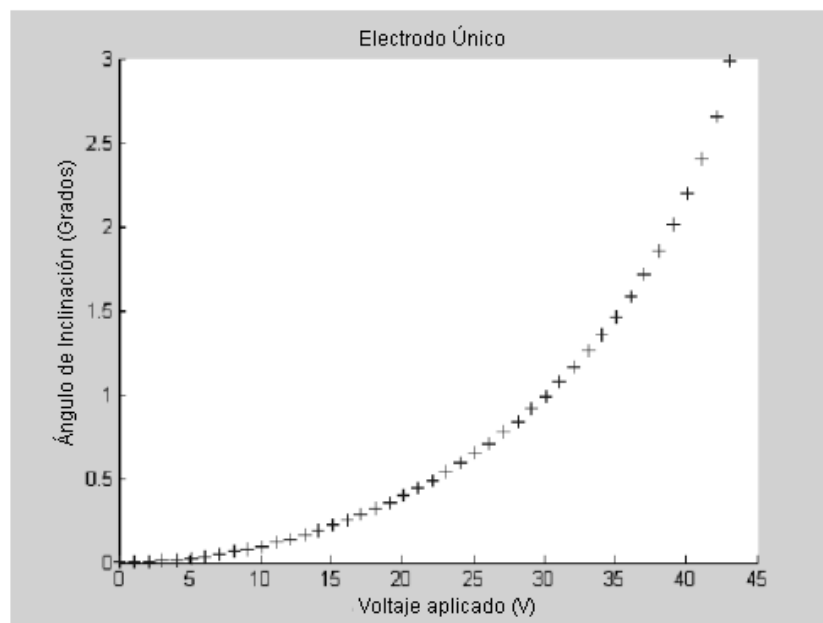


Figura 3.19 Curva del ángulo de torsión vs voltaje del microespejo torsional, manejado por un único electrodo

Es fácil observar que la curva ángulo-voltaje del microespejo torsional presenta un comportamiento no lineal. Esta no linealidad presenta dificultades para alcanzar ángulos de escalonamiento lineales. Por lo tanto, la pregunta sobre cómo alcanzar un comportamiento lineal en la curva ángulo-voltaje, representa un problema importante al momento de diseñar el microespejo.

### 3.3.1.2 Respuesta Escalón Del Microespejo Con Amortiguamiento Viscoso

La respuesta escalón con el efecto de amortiguamiento viscoso para el modelo acoplado dinámicamente, donde se asume por conveniencia  $R_1=R_2=R$  en el cálculo de la ecuación 3.76.

Cuando el voltaje aplicado es bajo, las respuestas de vibración debidas a la torsión y a la deflexión se aproximan al modelo no acoplado. De este modo, al incrementar el voltaje aplicado, la influencia de la vibración por deflexión debida al efecto de acoplamiento es mayor que la causada por el efecto torsional.

Teóricamente, el periodo la respuesta torsional del microespejo con efecto de amortiguamiento, aumentará con el incremento de voltaje que es similar a la respuesta sin efecto de amortiguamiento. Esto quiere decir que a mayor coeficiente de amortiguamiento, mayor será el periodo de la respuesta. Más aún, el periodo del sistema acoplado es mayor que el del sistema no acoplado bajo la aplicación del mismo valor de voltaje.

Cuando el voltaje aplicado es mayor que el voltaje de entrada, el sistema se vuelve inestable a cierto valor de  $\tau$ , que depende del voltaje aplicado. A mayor voltaje aplicado, que esté más allá del voltaje de entrada, se puede causar más pronto una inestabilidad.

La respuesta torsional suele sobrepasar los límites y el tiempo de levantamiento cuando el efecto de acoplamiento es mayor que en el caso no acoplado. Al mismo tiempo, el sobrepaso y el tiempo de levantamiento incrementan conforme aumenta el voltaje aplicado.

### 3.3.2 Respuesta Armónica del Microespejo

La respuesta armónica es otra característica importante para las aplicaciones de los microespejos.

Cuando se aplica un voltaje de excitación armónica,  $V = V_0 \text{ sen}(\omega t)$ , entre el microespejo y la placa del electrodo, su ecuación queda como:

$$V^2 = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\lambda\tau)V_0^2 \quad (3.79)$$

Donde  $\tau = \omega_0 t$  y  $\lambda = \omega/\omega_0$  y  $\omega$  es la frecuencia angular del voltaje de excitación. Cuando el voltaje de excitación armónica sea aplicado al microespejo, la nueva excitación podría verse como un escalón de excitación y una excitación armónica con una frecuencia angular de  $2\omega$ , indicado en la ecuación 3.79.

De esta manera, la respuesta a la excitación armónica anterior, comprende tanto la respuesta transitoria como la respuesta de estado estacionario. Para obtener la respuesta armónica del microespejo, se puede sustituir la ecuación 3.79 en la ecuación 3.76, donde los coeficientes de amortiguamiento del microespejo aún se asumen como  $R_1=R_2=R$ .

Así, cuando la frecuencia del voltaje aplicado es mucho menor o mayor que la frecuencia de resonancia, la amplitud de las armónicas no son tan grandes, y las respuestas torsional y de deflexión se aproximan a las del modelo no acoplado. Sin embargo, si la frecuencia del voltaje aplicado se aproxima mucho a la frecuencia de resonancia torsional, la vibración por deflexión se ve influenciada en gran parte por el efecto de acoplamiento, a pesar de que la amplitud del voltaje de entrada sea pequeña.

## **CAPÍTULO IV**

### **Simulación Del Microespejo Torsional Propuesto**

#### **4. Diseño del Microespejo para simulación**

Los dispositivos con microespejos torsionales tradicionales accionados por un solo electrodo, presentan dificultades al tratar de lograr efectos de escalonamiento de ángulos debido a sus características de transferencia entre ángulo y voltaje.

De este modo, teniendo el concepto de un microespejo controlado por dos microelectrodos, se pretende suavizar ese inconveniente. Sin embargo, primero hay que poder establecer la respuesta del microespejo bajo ciertas condiciones de voltaje y fuerzas, tal que la estructura soporte su manipulación electrónica.

El reto de diseño para el control del microespejo, es la demanda de que el microespejo resista inclinarse a diferentes ángulos de inclinación sin presentar fracturas o vibraciones incontrolables, para diversos requerimientos ópticos.

Se propone de tal modo una aproximación para realizar un microespejo torsional con comportamiento lineal. Así, cada electrodo puede ser seleccionado independientemente para activarlo (conectarlo a voltaje) o para dejarlo inactivo (conectarlo a tierra).

Se utilizarán simulaciones hechas con el método de elemento finito para simular la respuesta del microespejo tanto en comportamiento lineal, como su resistencia a las fuerzas a las que será sometido. Se pretende que los resultados de las simulaciones validen el concepto.

#### **4.1 Especificaciones de Diseño para el Microespejo con Electrodo Accionados Simultáneamente**

Teniendo como base el modelo matemático simple del microespejo, ya desarrollado, se pueden predecir las características de transferencia entre ángulo y voltaje del dispositivo propuesto que serán simuladas por medio del elemento finito.

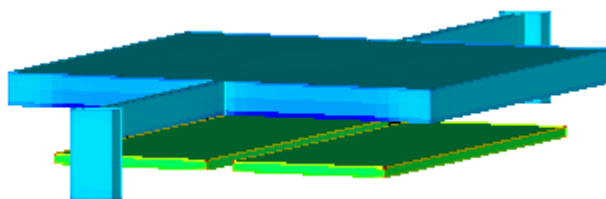


Figura. 4.1 Modelo del microespejo torsional en 3-d de Coventor Ware

Típicamente, la curva de transferencia que se obtiene de un dispositivo con un solo electrodo será no lineal en el plano ángulo-voltaje, tal como la que se muestra en la figura 3.19 del capítulo anterior. Por lo tanto, se espera que la curva ángulo voltaje para el caso del dos electrodos sea muy parecida.

Los parámetros simulados en Coventor son idénticos a los que están listados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros de diseño del microespejo torsional propuesto

Parte Geométrica	Notación	Valor Numérico	Parte Geométrica	Notación	Valor Numérico
Largo del microespejo	$L$	$600\mu\text{m}$	Ancho de la viga torsional	$w$	$2\mu\text{m}$
Ancho del microespejo	$W$	$300\mu\text{m}$	Grosor de la viga torsional	$t$	$2\mu\text{m}$
Largo efectivo de cada electrodo	$l_e=L$	$600\mu\text{m}$	Largo total de las vigas torsionales	$l$	$200\mu\text{m}$
Ancho de los electrodos	$w_e=a_2-a_1$	$70\mu\text{m}$	Largo de una sola viga torsional	$l/2=l_v$	$100\mu\text{m}$
Largo de cada electrodo	$l_e$	$100\mu\text{m}$	Parámetro de posición de los electrodos	$a_1=\alpha W$	$\mu\text{m}$
Espacio entre microespejo y electrodos	$d$	$50\mu\text{m}$	Parámetro de tamaño de los electrodos	$a_2=\beta W$	$\mu\text{m}$

## 4.2 Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos, es un método numérico que se ha convertido en los últimos años en una herramienta importante a nivel industrial, de investigación y

académico. El Método consiste en resolver mediante ecuaciones matriciales, las ecuaciones diferenciales que se plantean en sistemas discretos o continuos.

En el caso de sistemas continuos, se divide un dominio en varios elementos, describiendo el comportamiento de cada uno de estos últimos de manera discreta.

Entonces, se conectan los elementos a través de sus nodos para representar el problema completo. Este proceso conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas.

A continuación se explicarán los pasos del método de elementos finitos para la resolución de un sistema continuo.

#### **4.2.1 División del sistema.**

Dividir el sistema en Elementos Finitos: Triángulos (3 nodos), Tetraedros (4 nodos), etc. En este paso se define la malla que discretiza la estructura por analizar, se dan las restricciones de deformación, las propiedades de los materiales que la forman, así como las acciones mecánicas externas que actúan en ella, es decir, esta fase consiste en definir los datos de entrada del problema.

#### **4.2.2 Ecuación de potencial.**

Deducir la ecuación que describe el potencial dentro de un elemento finito. Esta fase consiste en la formulación y el planteamiento de ecuaciones de equilibrio para el modelo desarrollado.

#### **4.2.3 Condiciones de frontera.**

Plantear las ecuaciones que dan las condiciones de ajuste de las soluciones en las fronteras de los elementos finitos. Usando las aproximaciones adecuadas para elemento seleccionado, se obtienen la matriz de rigidez y el vector de fuerzas nodales equivalentes, los cuales se determinan para cada elemento.

- Los contornos pueden ser irregulares
- Los elementos finitos serán tan chicos como lo considere el usuario. Cuanto más varía el potencial, los elementos finitos deberán ser más chicos.

#### **4.2.4 Cálculo de los potenciales.**

Calcular los potenciales en los nodos de cada elemento finito. Obtenidas las ecuaciones de equilibrio para cada elemento de la discretización se procede a ensamblar las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas nodales. Con este paso se modela el problema entero y se realiza el cálculo de la solución del problema.

#### **4.2.5 Resolución de las ecuaciones planteadas.**

Al resolver las ecuaciones algebraicas planteadas, la matriz de rigidez y el vector de fuerzas de toda la estructura se construyen identificando las condiciones de continuidad entre los elementos, relacionando los nodos del elemento con los nodos globales correspondientes.

El sistema de ecuaciones resultante se resuelve para obtener valores de los desplazamientos nodales. Una vez obtenidos estos desplazamientos se pueden calcular las deformaciones, los esfuerzos y las reacciones en los nodos con movimientos restringidos

#### **4.2.6 Interpretación de resultados.**

Finalmente se procede a la interpretación de los resultados obtenidos, presentados en una manera accesible para el usuario. Por lo tanto, la interfaz gráfica muestra el comportamiento de la estructura a través de las distribuciones de esfuerzos y deformaciones

El propósito del Método de Elementos Finitos es de llevar a cabo pruebas en una estructura sin tener que construirla y así ahorrar tiempo y dinero. Cuando el modelo en computadora hace lo que el diseñador quiere que haga, solamente en este momento se va a construir la estructura física.

### **4.3 Simulaciones de Elemento Finito**

Con la finalidad de verificar el modelo matemático propuesto, se utilizará una herramienta para análisis de elemento finito para MEMS: el software comercial de simulación CoventorWare, construyendo en él el microespejo torsional con la geometría, los parámetros, las propiedades de los materiales, las condiciones de frontera y el voltaje aplicado.

#### **4.3.1 CoventorWare**

CoventorWare es una herramienta totalmente integrada para producir modelos precisos de diseños de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos, ya que soporta aproximaciones tanto físicas como de sistema.

Cuenta a su vez con una herramienta de modelado para generar un plano de diseño en 2-D que posteriormente servirá para verificar el modelo en la aproximación física.

Por lo tanto la aproximación física comienza con los planos de diseño en 2-D que posteriormente se utilizarán para construir un modelo en 3-D, generar un mallado y,



utilizando el Modelo de los Elementos Finitos, simular la respuesta del sistema bajo diversas condiciones electromecánicas.

Los componentes principales del software son los que se explican a continuación en los puntos 4.3.1.1 al 4.3.1.7.

#### **4.3.1.1 Base de datos de Propiedades de los materiales.**

Actúa como base de datos de los materiales que se utilizarán en el flujo de diseño.

#### **4.3.1.2 Editor de Procesos.**

Permite la creación del flujo de proceso de micromaquinado con el cual se fabricara el diseño MEMS.

Aquí se establecen los materiales, los nombres de las máscaras y los modos de deposición y atacado que se utilizarán durante el proceso, utilizando una secuencia simplificada de pasos de depósito y atacado, en este caso, Coventor cuenta con los pasos y características del Proceso MUMPS.

#### **4.3.1.3 Arquitecto**

Simula la configuración de diseño utilizando la aproximación de sistema, tal que se puede refinar la modelo y luego extraerlo al Editor de Plano 2-D para realizar un análisis de MEF.

#### **4.3.1.4 Diseñador.**

Diseña el modelo MEMS utilizando como herramienta planos en 2-D y un generador automático del modelo en 3-D. Estos pasos también se refieren como un diseño de principio a fin.

#### **4.3.1.5 Mallado**

Crea capas de mallas en 3-D basadas en el modelo sólido. Coventor cuenta con varias opciones de mallado, incluyendo mallado de superficie, tetraédrico, de extrusión y tipo ladrillo. Este paso prepara al modelo para el análisis MEF

#### **4.3.1.6 Analizador**

En éste se establecen las condiciones de frontera y se escoge uno o más tipos de herramientas para resolver el análisis de MEF.

Consta de herramientas que tienen también capacidades de simulación, esto quiere decir que se pueden variar parámetros durante el proceso y generar corridas con

iteraciones. Además se pueden observar los resultados de las simulaciones en 3-D y extraer los datos obtenidos de la resolución

De tal modo, el Analizador incluye componentes electrostáticos, mecánicos, térmicos, de fluidos y de soluciones acopladas. Permiten muchos diferentes tipos de soluciones de entre las cuales se pueden mencionar:

- Cálculo de capacitancia y carga
- Deformaciones debidas a presiones o fuerzas
- Soluciones electromecánicas acopladas
- Soluciones utilizando las condiciones de frontera de contacto total
- Solución utilizando gradientes de tensión aplicada
- Análisis modal para frecuencias naturales de vibración en los modelos matemáticos
- Análisis de armónicas, entre otras.

#### **4.3.1.7 Visualizador**

Proporciona una salida para la mayoría de los modelos MEMS que incluye una gran cantidad de datos del análisis y de la solución. Esto es, incluye tablas con los valores de los resultados iniciales y también proporciona resultados gráficos en soluciones que así lo requieran.

Además permite observar gráficamente los resultados obtenidos del modelo original y visualizar la solución.

Las soluciones pueden ser campos electrostáticos, deformaciones mecánicas tensiones, variaciones térmicas, gradientes de temperatura, etc. Estos parámetros se seleccionan en el modelo 3-D y se muestra un modelo coloreado con las características solicitadas, permitiendo un análisis completo del modelo y su solución.

### **4.3.2 Proceso de Simulación en Coventor Ware**

#### **4.3.2.1 Construcción del Modelo**

Como se mencionó en la sección anterior, el software CoventorWare cuenta con varias herramientas sencillas para la simulación de un modelo MEMS, de tal modo, en la ventana inicial del programa, se pueden elegir tanto las propiedades de los materiales, el proceso de micromaquinado, la herramienta de dibujo de los planos de diseño, o el analizador (ver figura 4.2).

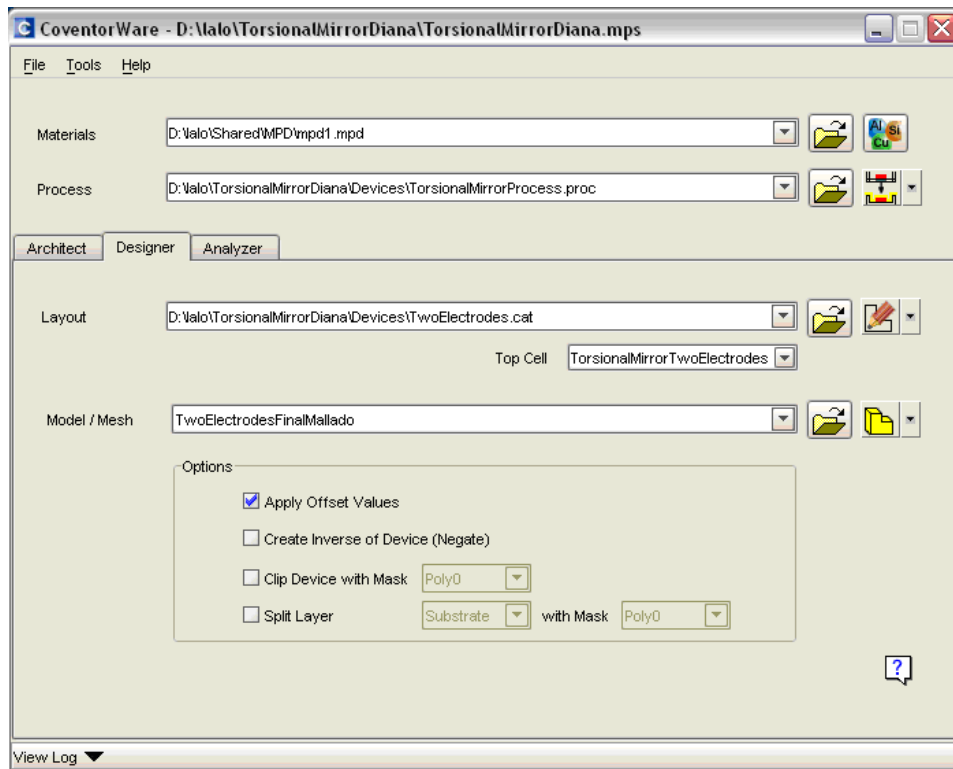


Figura 4.2 Ventana principal de Coventor

En la figura 4.3 se muestra el proceso de micromaquinado de superficie, en este caso se eligió el proceso PolyMUMPS, a partir del cual se simulará la construcción del microespejo torsional propuesto.

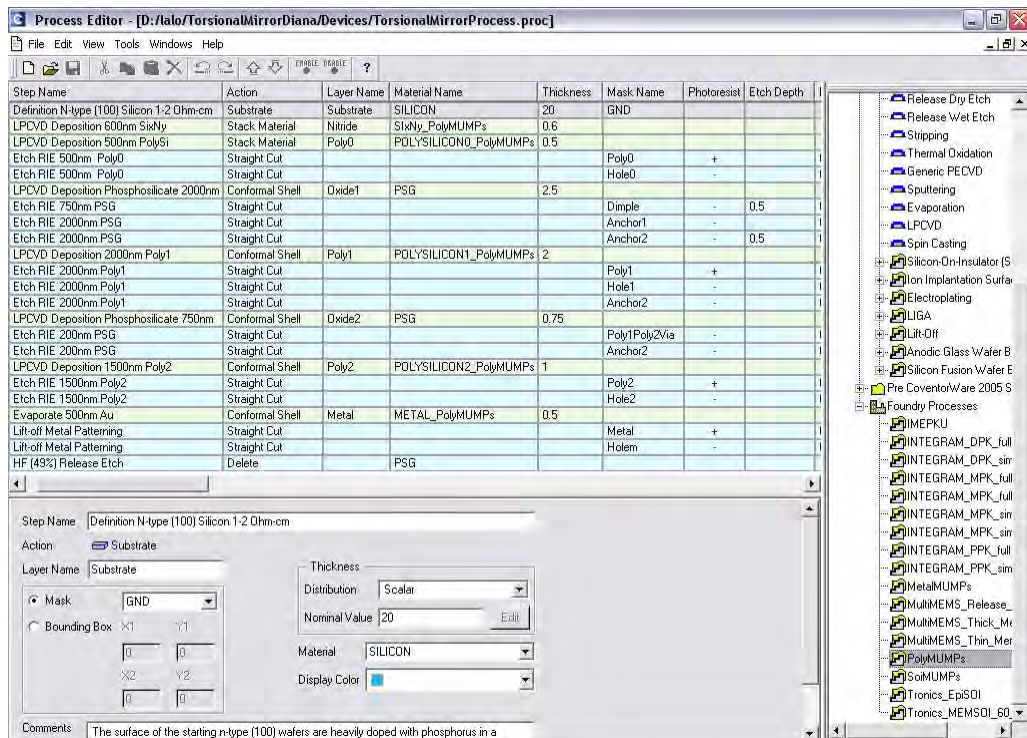


Figura 4.3 Proceso de micromaquinado PolyMUMPS

Al tener bien claras las características del proceso PolyMUMPS, tanto de las capas de deposición, como las máscaras y los atacados de las mismas, se pudo diseñar el modelo en planos 2-D, para poder así generar el modelo sólido. En la figura 4.4 se muestra el modelo completo, con todas las capas y máscaras que definen al microespejo como cuerpo sólido.

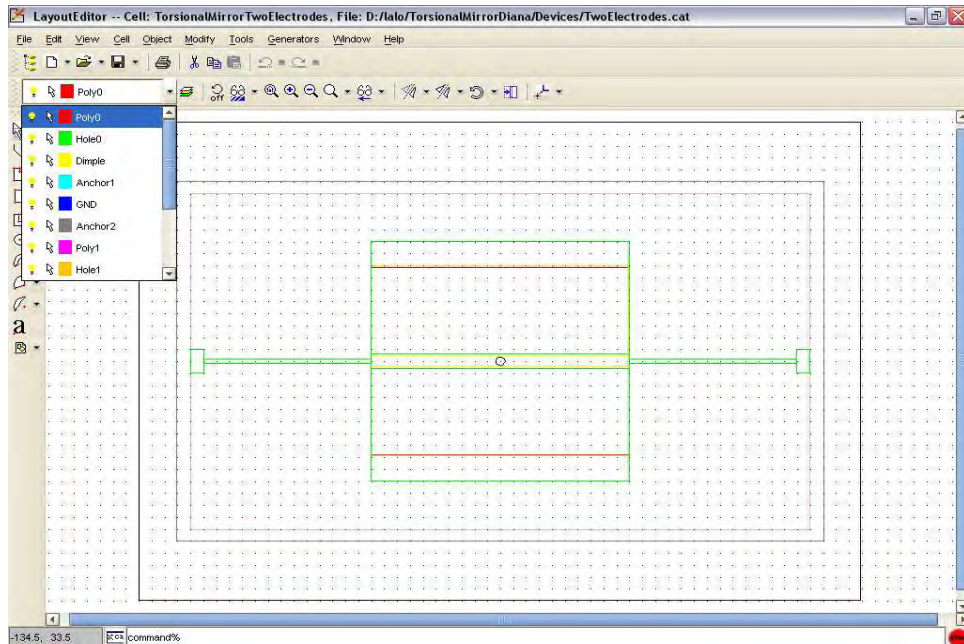


Figura 4.4 Planos de diseño del microespejo para máscaras y atacados

En la figura 4.5 se observan las medidas con las que se generó en modelo, basadas en los cálculos de diseño previos.

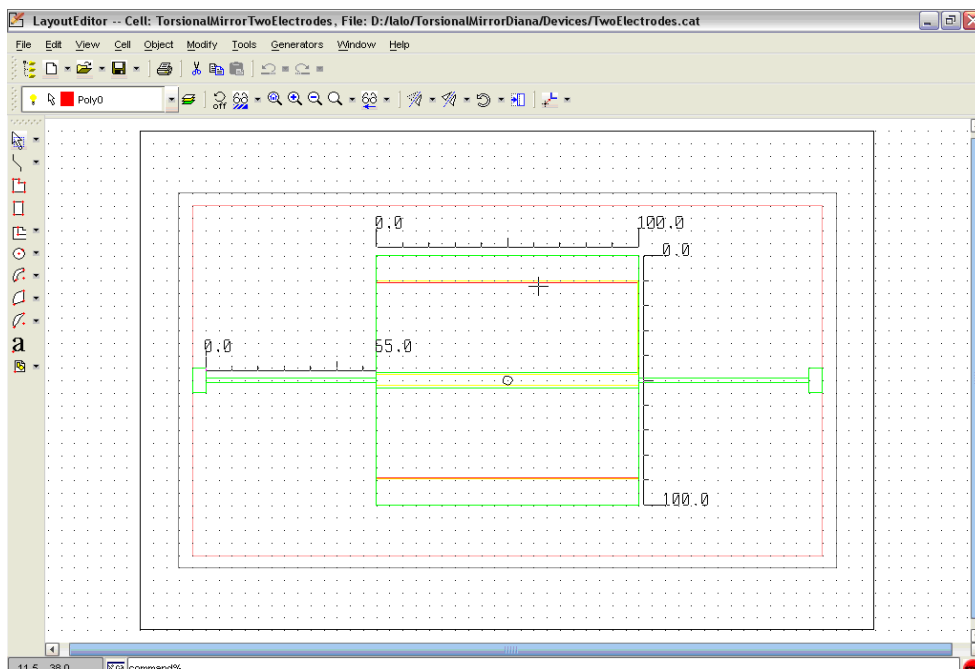


Figura 4.5 Medidas del microespejo

Las figuras 4.6 a la 4.9 muestran algunas de las máscaras para el proceso de atacado, individualmente.

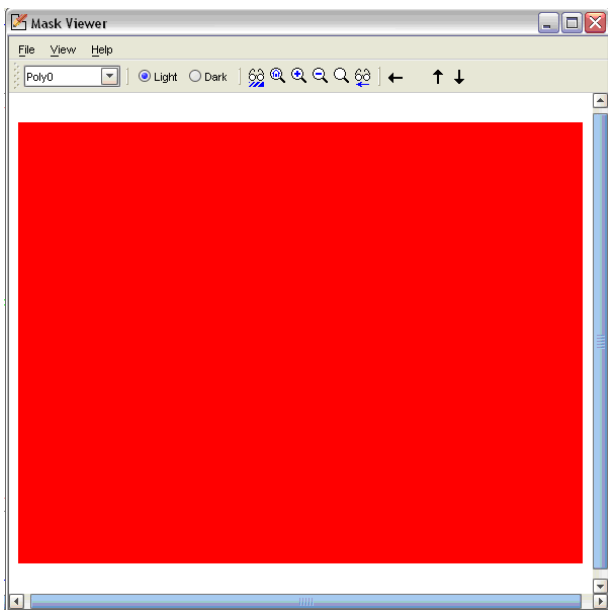


Figura 4.6 Máscara de Poli0

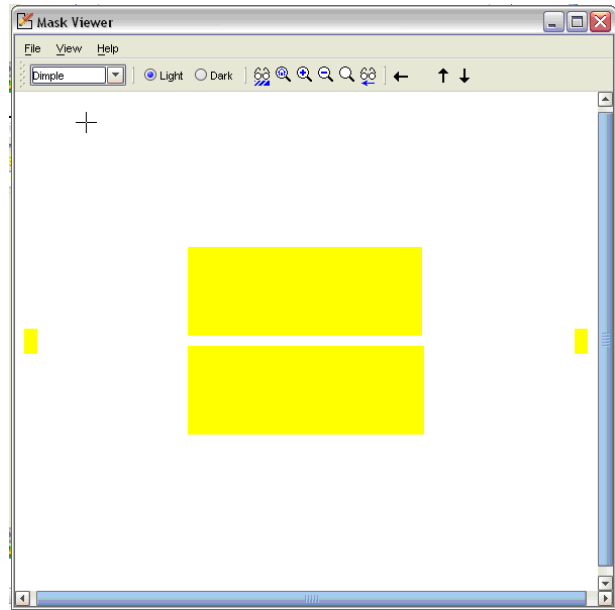


Figura 4.7 Máscara para los electrodos

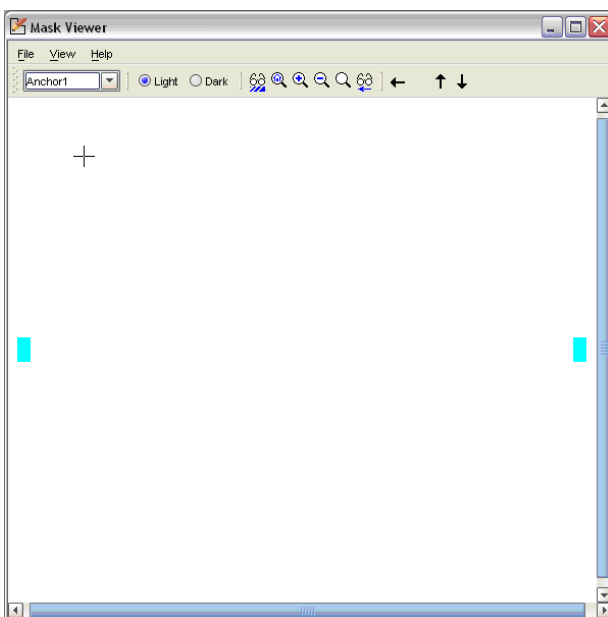


Figura 4.8 Máscara para los anclajes  
microespejo

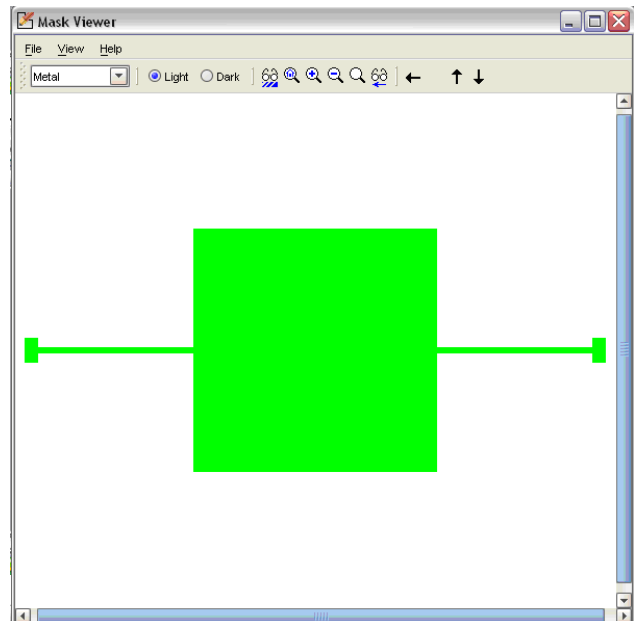


Figura 4.8 Máscara para la placa del  
microespejo

La figura 4.10 muestra el modelo sólido del microespejo torsional basado tanto en los pasos del proceso PolyMUMPS, como en los planos de diseño en 2-D y, para poder proceder al análisis mediante MEF, se estableció sobre el modelo, un mallado tipo Bloques Manhattan (como se muestra en la figura 4.11), además de que se procedió a nombrar todas las entidades a analizar del microespejo (placa del microespejo, vigas torsionales, electrodos y anclajes).

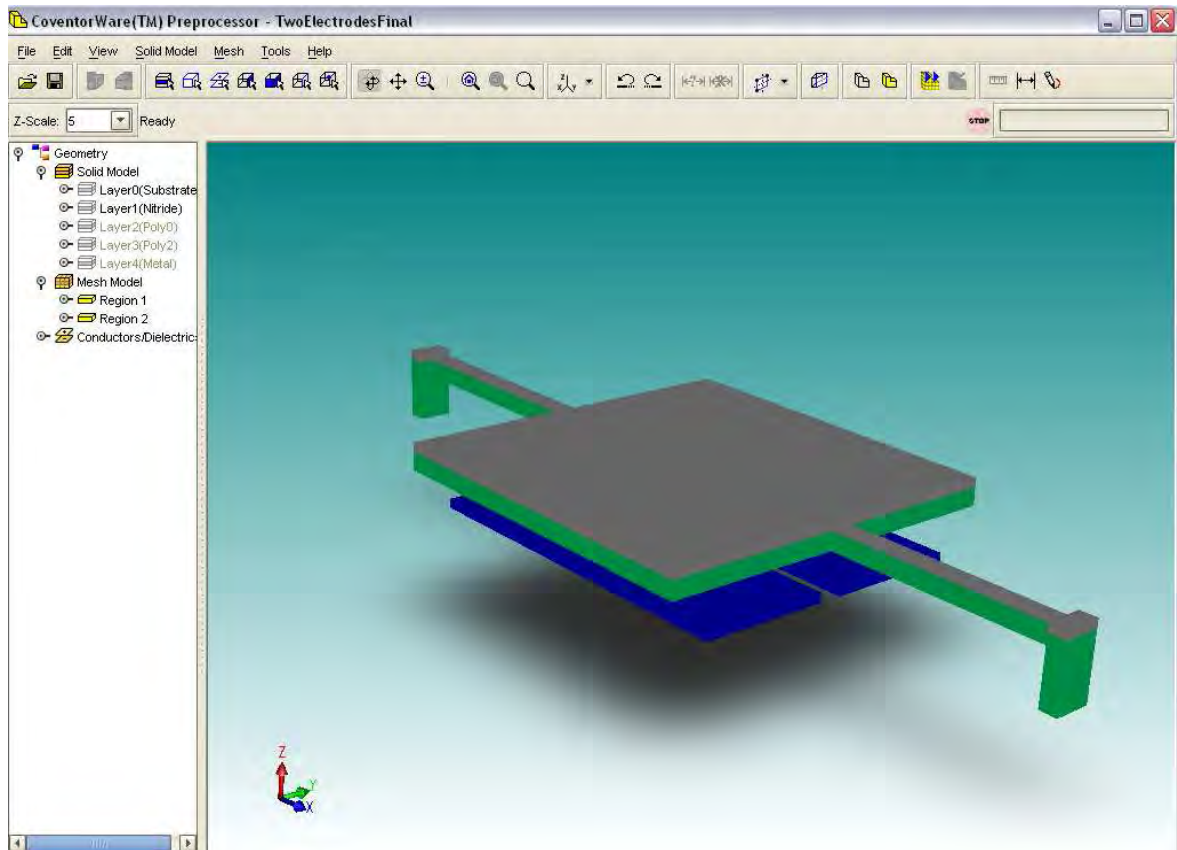


Figura 4.10 Modelo sólido o en 3-D del microespejo torsional

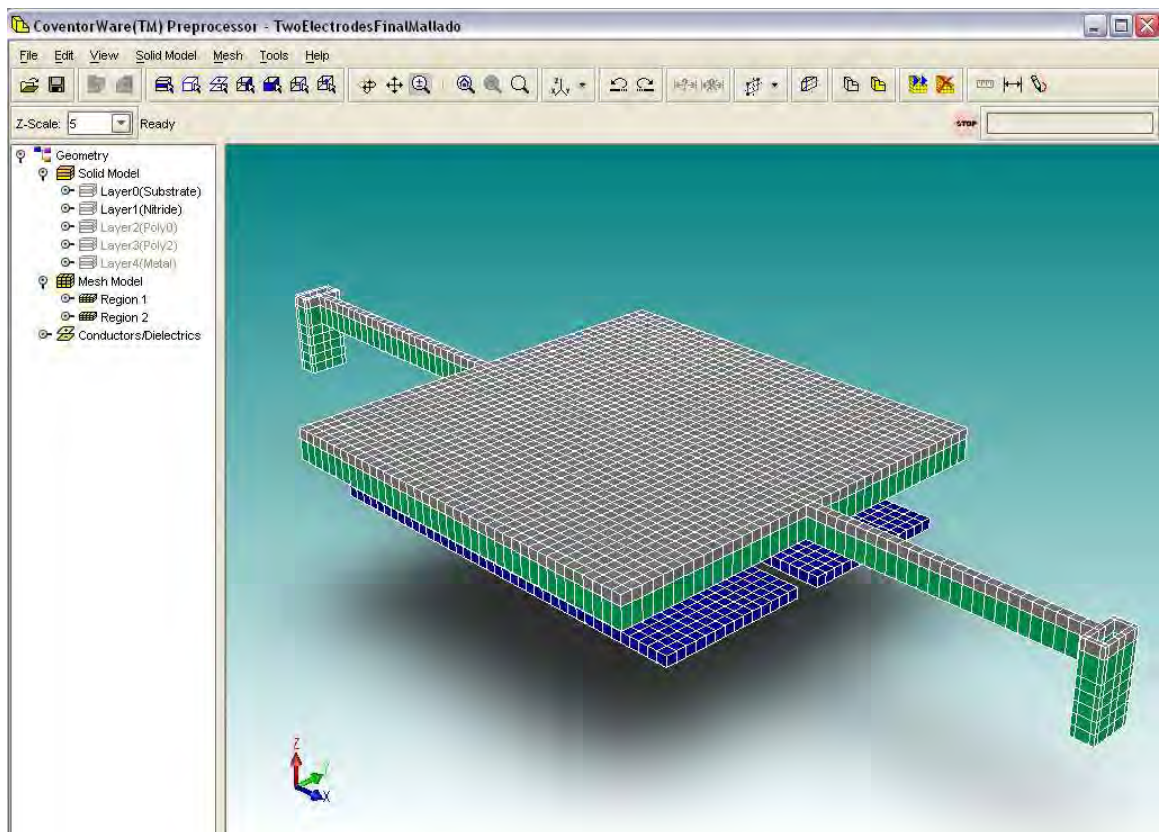


Figura 4.11 Modelo en 3-D del microespejo torsional con mallado tipo Bloques Manhattan

En las siguientes figuras (4.12 y 4.13) se muestran las ventanas correspondientes a los tipos de análisis a los que se sometió el modelo, cuyos resultados serán analizados en el siguiente capítulo

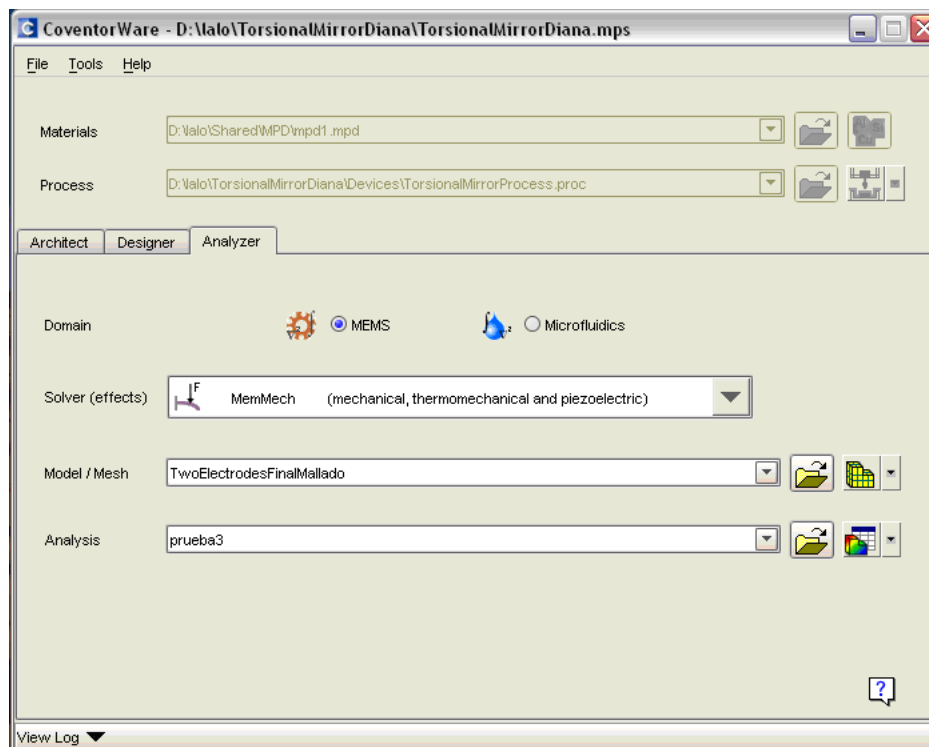


Figura 4.12 Interfaz de la herramienta Analizador de Coventor Ware

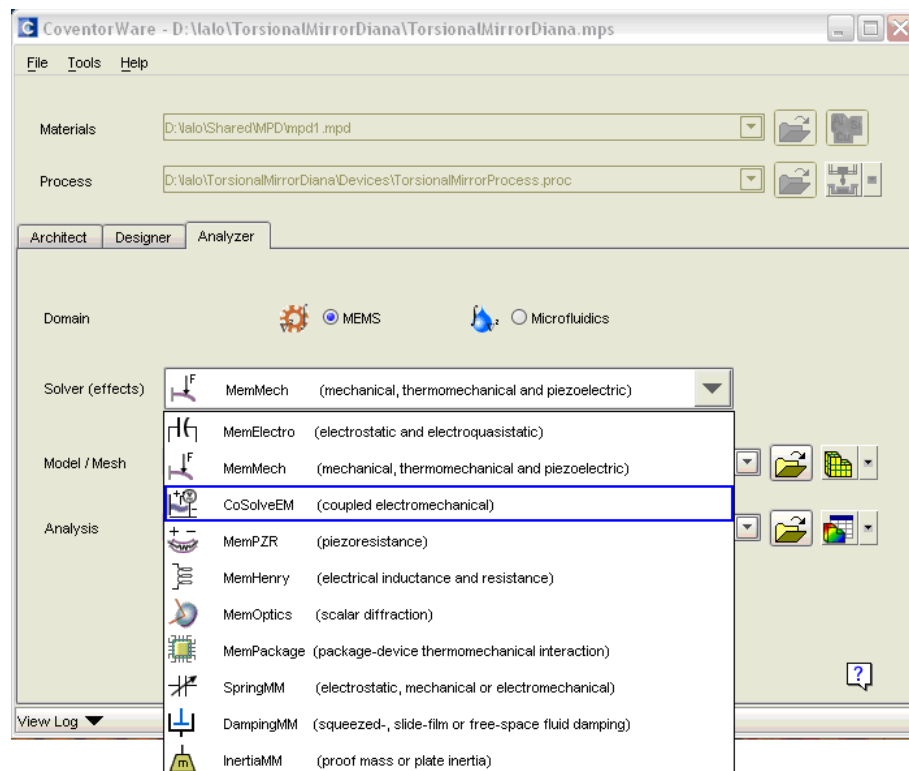


Figura 4.13 Diferentes procesos de análisis que pueden elegirse en Coventor

## 4.4 Obtención de resultados

Después de haber determinado las condiciones de frontera y el valor del voltaje a utilizar, para las condiciones que son de interés para el modelo propuesto, se obtuvieron los resultados de la simulación.

Los resultados del desplazamiento de la placa del microespejo son fundamentales para determinar la relación ángulo-voltaje, de igual modo los de la tensión en las vigas torsionales, sirvieron para determinar si resisten el momento de torsión que sufren con la fuerza de atracción que generan los electrodos y no se fracturan, así como la respuesta a los tres diferentes modos de vibración más comunes.

### 4.4.1 Parámetros utilizados para la simulación

Las siguientes figuras, muestran los parámetros que se ingresaron en Coventor para llevar a cabo la simulación. Para ello se seleccionó el análisis CoSolve, el cual lleva a cabo simulación de parámetros electrónicos y mecánicos en un solo análisis.

En las figuras 4.14 y 4.15 se observan las ventanas donde se ingresaron los parámetros para el análisis electromecánico.

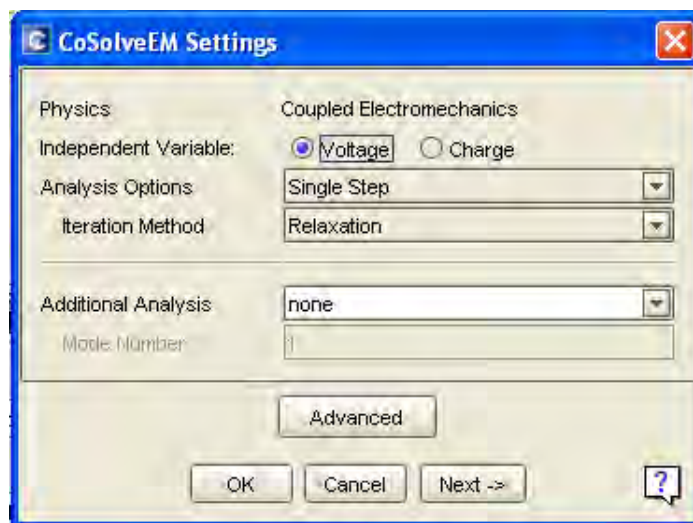
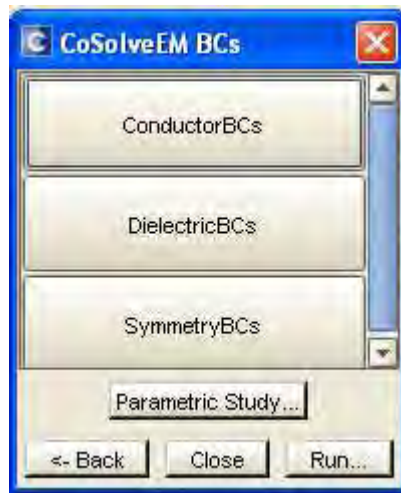


Figura 4.14 Parámetros para el análisis electromecánico CoSolve

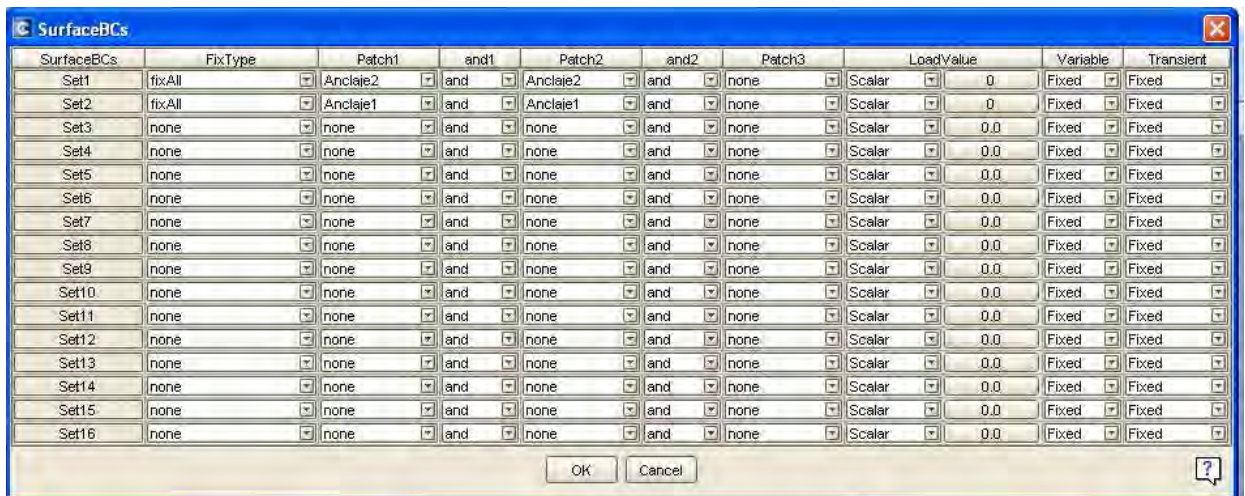




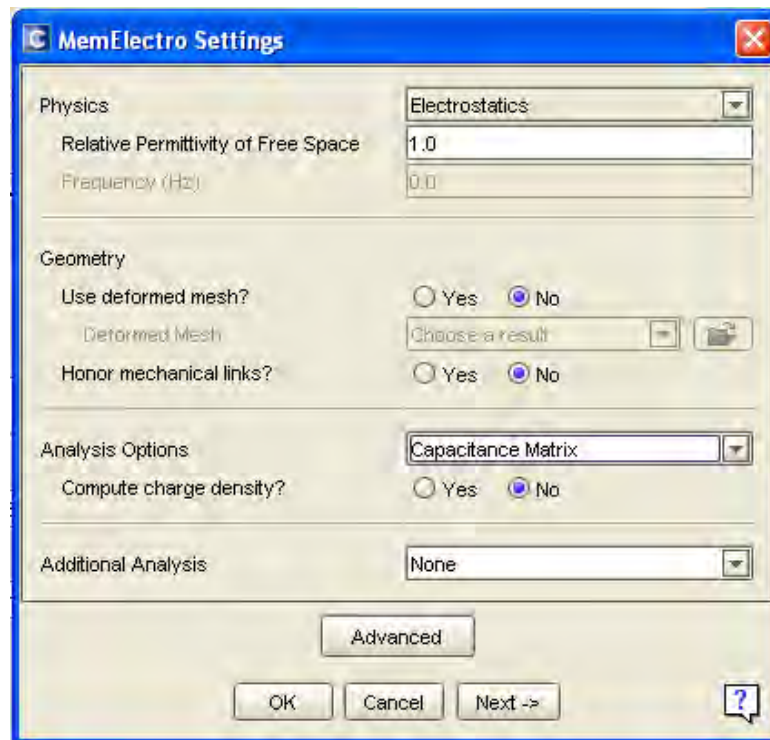
4.15 Ventana de opciones para definición de parámetros de CoSolve

Sin embargo, el análisis electromecánico CoSlove requiere además que se ingresen parámetros eléctricos y mecánicos, por lo que es necesario seleccionar tanto las opciones MemElectro como MemMech, para fijar las condiciones de frontera que servirán como base del análisis.

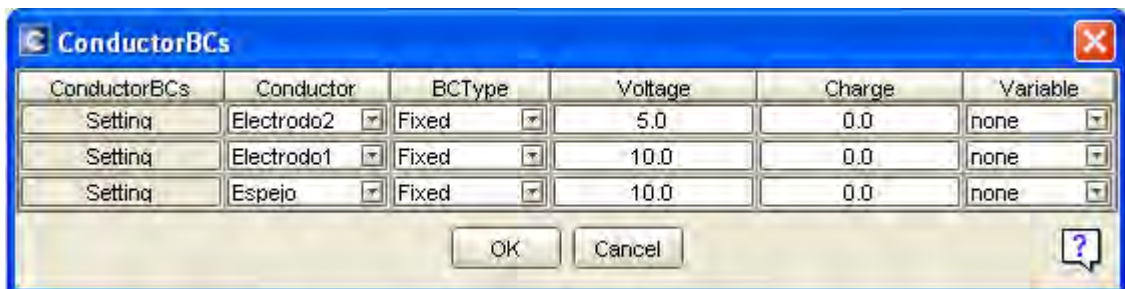
Las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 muestran los parámetros eléctricos y mecánicos ingresados para la realización del análisis.



4.16 Ventana de opciones para definición de parámetros mecánicos

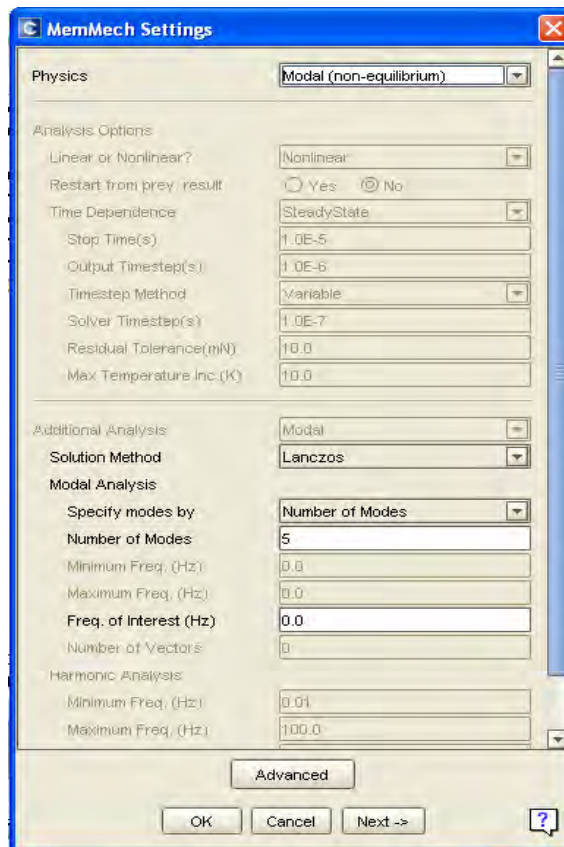


4.17 Ventana de opciones para definición de parámetros electrónicos



4.18 Ventana de opciones para definir los de parámetros de los conductores

De igual modo, para poder obtener los resultados del análisis de modos de frecuencias de vibración se seleccionó la opción MemMech, el cual lleva a cabo análisis puramente mecánicos.



4.19 Ventana de opciones para definición de parámetros del análisis modal

#### 4.4.1.1 Resultados de la simulación del desplazamiento de la placa del microespejo

La tabla 4.2 muestra los resultados de desplazamiento vertical de la placa del microespejo, obtenidos en Coventor al aplicar como condición de la simulación, un voltaje de 1 a 10 V en cada uno de los electrodos y accionados independientemente, tal como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de voltaje aplicado en cada electrodo.

	Elect1	Elect2	V_Electrodo2	V_Electrodo1	V_Espejo
step_1	1	10	100	10	0
step_2	2	9	90	20	0
step_3	3	8	80	30	0
step_4	4	7	70	40	0
step_5	5	6	60	50	0
step_6	6	5	50	60	0
step_7	7	4	40	70	0
step_8	8	3	30	80	0
step_9	9	2	20	90	0
step_10	10	1	10	100	0

En la tabla 4.3 se puede observar que el desplazamiento vertical máximo para la placa fue de 3.4184  $\mu\text{m}$  y de -3.4183  $\mu\text{m}$ , respecto a la posición original del microespejo, como se muestra en la tabla 4.3, en la que las partes de la placa con mayor desplazamiento están coloreadas de rojo y las de ninguno de azul. Este dato es muy importante ya que demuestra que en desplazamiento máximo vertical, el microespejo no tendrá contacto con la superficie base de nitruro ni con los electrodos, ya que la altura de la placa del microespejo en estado de reposo es de 3.75  $\mu\text{m}$  –por el proceso PolyMUMPS (ver figura 4.3 -).

Tabla 4.3 Resultados de desplazamiento de la placa del microespejo, respecto a los tres ejes coordenados, con 10 pasos de voltaje aplicado.

	Elect1	Elect2	Max	MaxX	MaxY	MaxZ	Min	MinX	MinY	MinZ
step_1	1	10	4.262855E01	6.561869E-02	1.384999E01	3.418407E01	0	-6.561884E-02	-1.822655E01	-3.884804E01
step_2	2	9	3.405048E01	5.628617E-02	8.37439E00	2.721554E01	0	-5.628629E-02	-1.163023E01	-3.219611E01
step_3	3	8	2.519081E01	4.787309E-02	4.143503E00	1.936302E01	0	-4.787319E-02	-6.359321E00	-2.447509E01
step_4	4	7	1.617371E01	4.072238E-02	1.318303E00	1.087172E01	0	-4.072246E-02	-2.610765E00	-1.599798E01
step_5	5	6	7.102259E00	3.468411E-02	3.159382E-02	1.982216E00	0	-3.468419E-02	-4.645996E-01	-7.091063E00
step_6	6	5	7.101402E00	3.468358E-02	4.644697E-01	1.981359E00	0	-3.468364E-02	-3.155106E-02	-7.090232E00
step_7	7	4	1.617271E01	4.072181E-02	2.610432E00	1.087073E01	0	-4.072188E-02	-1.31807E00	-1.599701E01
step_8	8	3	2.518982E01	4.787252E-02	6.358813E00	1.936208E01	0	-4.787261E-02	-4.143098E00	-2.447419E01
step_9	9	2	3.404936E01	5.628553E-02	1.162946E01	2.721455E01	0	-5.628565E-02	-8.373739E00	-3.219519E01
step_10	10	1	4.262735E01	6.561805E-02	1.822552E01	3.418309E01	0	-6.56182E-02	-1.384908E01	-3.884718E01

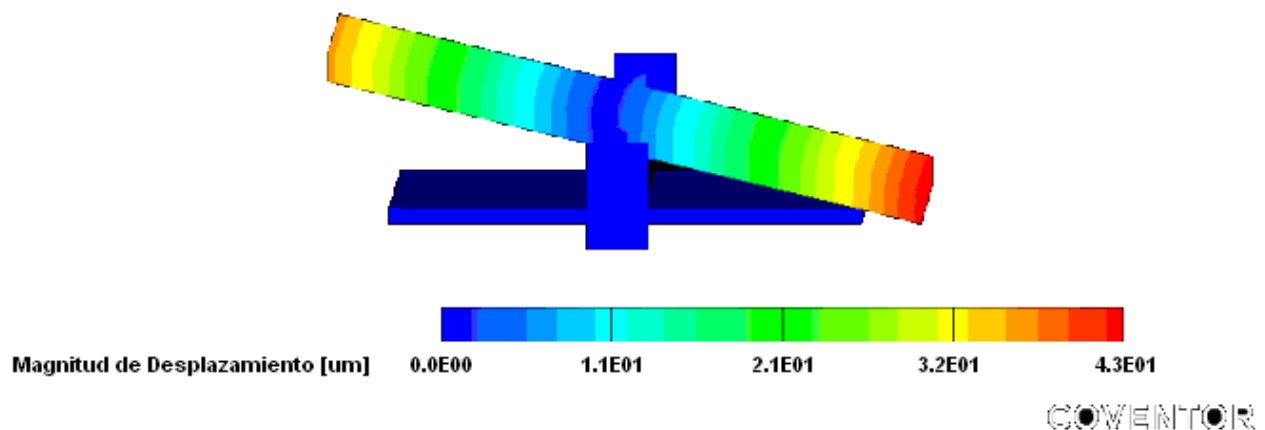


Figura 4.20 Ejemplo del desplazamiento máximo del microespejo a máximo valor de voltaje

En la siguiente gráfica (figura 4.21) se observa el comportamiento lineal de desplazamiento del microespejo, el cual llega a un punto de equilibrio para cuando el voltaje en ambos electrodos se encuentran entre 5 y 6V, dado que sus fuerzas se contrarrestan.

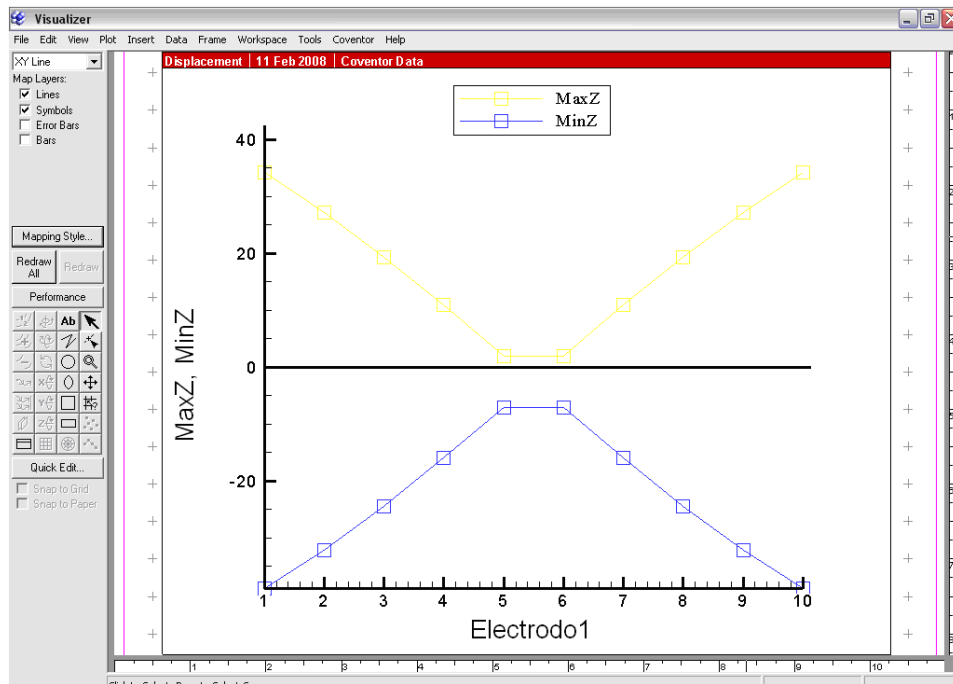


Figura 4.21 Comportamiento de desplazamiento de la placa del microespejo respecto al funcionamiento de los dos electrodos

#### 4.4.1.2 Relación entre los Ángulos de Desplazamiento y el Voltaje Aplicado

La tabla 4.4 muestra los diferentes ángulos obtenidos al aplicar voltajes de 1-10V en los electrodos, los cuales se obtuvieron con base en los resultados de desplazamiento obtenidos en la simulación con Coventor. En estos resultados se determinó que el ángulo máximo que alcanza la placa del microespejo es de 43.130°.

Tabla 4.4 Diferentes ángulos que logra la placa del microespejo, con 10 pasos de voltaje aplicado a los electrodos.

1	Displacement										
2		Elect1	Elect2	Max	MaxX	MaxY	MaxZ	Min	MinX	MinY	MinZ
3	step_1	1	10	42.6285518	0.06561869	13.8499899	34.1840706	0	-0.06561884	-18.226553	-38.8480377
4	step_2	2	9	34.0504791	0.05628617	8.37438965	27.2155399	0	-0.05628629	-11.6302309	-32.1961098
5	step_3	3	8	25.1908124	0.04787309	4.14350271	19.3630199	0	-0.04787319	-6.35932064	-24.4750919
6	step_4	4	7	16.1737139	0.04072238	1.31830251	10.8717232	0	-0.04072246	-2.61076498	-15.9979763
7	step_5	5	6	7.1022585	0.03468411	0.03159382	1.98221576	0	-0.03468419	-0.46459958	-7.09108305
8	step_6	6	5	7.1014021	0.03468358	0.46446967	1.98135948	0	-0.03468364	-0.03155106	-7.09023237
9	step_7	7	4	16.1727067	0.04072181	2.61043167	10.8707275	0	-0.04072188	-1.3180697	-15.9970055
10	step_8	8	3	25.1898187	0.04787252	6.35881329	19.3620777	0	-0.04787261	-4.14309788	-24.4741898
11	step_9	9	2	34.0493636	0.05628553	11.6294632	27.2145462	0	-0.05628565	-8.37373924	-32.1951904
12	step_10	10	1	42.6273469	0.06561805	18.2255173	34.183094	0	-0.0656182	-13.8490782	-38.8471756
13											
14											
15	Angle										
16		Elect1	Elect2	MaxZ	MinZ	sen θ MaxZ	sen θ Min Z		θ Max Z	θ MinZ	W=
17	step_1	1	10	34.1840706	-38.8480377	0.68368141	-0.77696075		43.1319957	-50.9831411	
18	step_2	2	9	27.2155399	-32.1961098	0.5443108	-0.6439222		32.9775786	-40.0849134	
19	step_3	3	8	19.3630199	-24.4750919	0.3872604	-0.48950184		22.7841405	-29.3078441	
20	step_4	4	7	10.8717232	-15.9979763	0.21743446	-0.31995953		12.5583912	-18.6604772	
21	step_5	5	6	1.98221576	-7.09108305	0.03964432	-0.14182166		2.27204736	-8.15327165	
22	step_6	6	5	1.98135948	-7.09023237	0.03962719	-0.14180465		2.27106537	-8.1522869	
23	step_7	7	4	10.8707275	-15.9970055	0.21741455	-0.31994011		12.5572224	-18.659303	
24	step_8	8	3	19.3620777	-24.4741898	0.38724155	-0.4894838		22.7829694	-29.3066586	
25	step_9	9	2	27.2145462	-32.1951904	0.54429092	-0.64390381		32.9762212	-40.0835365	
26	step_10	10	1	34.183094	-38.8471756	0.68366188	-0.77694351		43.1304623	-50.9815719	

De igual modo, se observa que los ángulos de escalonamiento alcanzados por la placa tienen un comportamiento lineal, como se muestra en la gráfica de la figura 4.22.

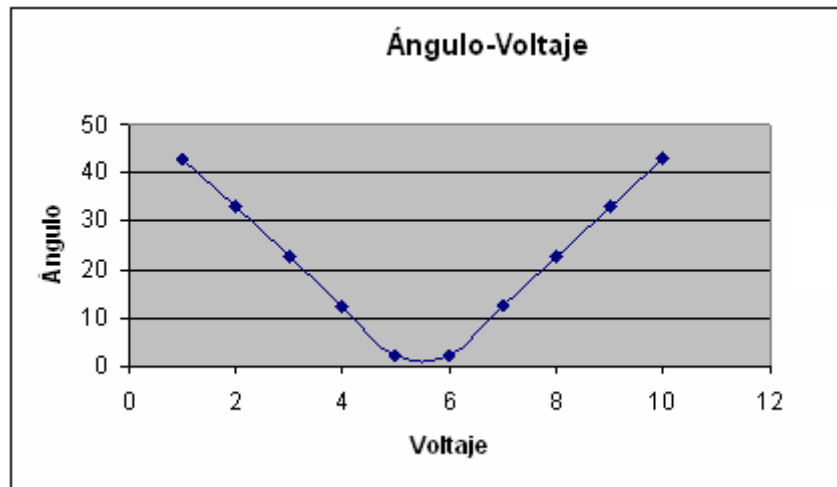


Figura 4.22 Relación ángulo-voltaje

#### 4.4.1.3 Resultados de la Simulación de Fuerza de Reacción en las Vigas torsionales.

La tabla 4.5 muestra los resultados de la fuerza de reacción en las vigas torsionales que soportan la placa del microespejo, obtenidos en Coventor al aplicar un voltaje de 1 a 10 V en cada uno de los electrodos y accionados independientemente.

Se puede observar, en la tabla 4.5, que la fuerza de reacción máxima en las vigas torsionales que soportan la placa fue de 1.418735 MPa, como se muestra en la figura 4.23, en la que las partes de las vigas torsionales con mayor fuerza de reacción están coloreadas de rojo y las que no presentan ninguna de azul.

Tabla 4.5 Resultados de la fuerza de reacción en las vigas torsionales del microespejo, respecto a los tres ejes coordenados, con 10 pasos de voltaje aplicado.

	Elect1	Elect2	Fx_Anclaje1	Fy_Anclaje1	Fz_Anclaje1	Fx_Anclaje2	Fy_Anclaje2	Fz_Anclaje2
step_1	1	10	-2.459988E02	1.499611E01	1.41868E01	2.45999E02	1.499621E01	1.418693E01
step_2	2	9	-2.110298E02	1.030197E01	1.404983E01	2.110299E02	1.030203E01	1.404995E01
step_3	3	8	-1.835399E02	6.549268E00	1.350145E01	1.8354E02	6.549303E00	1.350156E01
step_4	4	7	-1.645023E02	3.582185E00	1.290751E01	1.645024E02	3.582204E00	1.290762E01
step_5	5	6	-1.547839E02	1.132187E00	1.253901E01	1.54784E02	1.132196E00	1.253911E01
step_6	6	5	-1.547839E02	-1.131952E00	1.253902E01	1.54784E02	-1.131954E00	1.253912E01
step_7	7	4	-1.645025E02	-3.581901E00	1.290759E01	1.645026E02	-3.581914E00	1.29077E01
step_8	8	3	-1.8354E02	-6.548965E00	1.350157E01	1.835401E02	-6.548995E00	1.350169E01
step_9	9	2	-2.110299E02	-1.030161E01	1.405006E01	2.110301E02	-1.030166E01	1.405019E01
step_10	10	1	-2.459992E02	-1.49957E01	1.418719E01	2.459994E02	-1.49958E01	1.418735E01

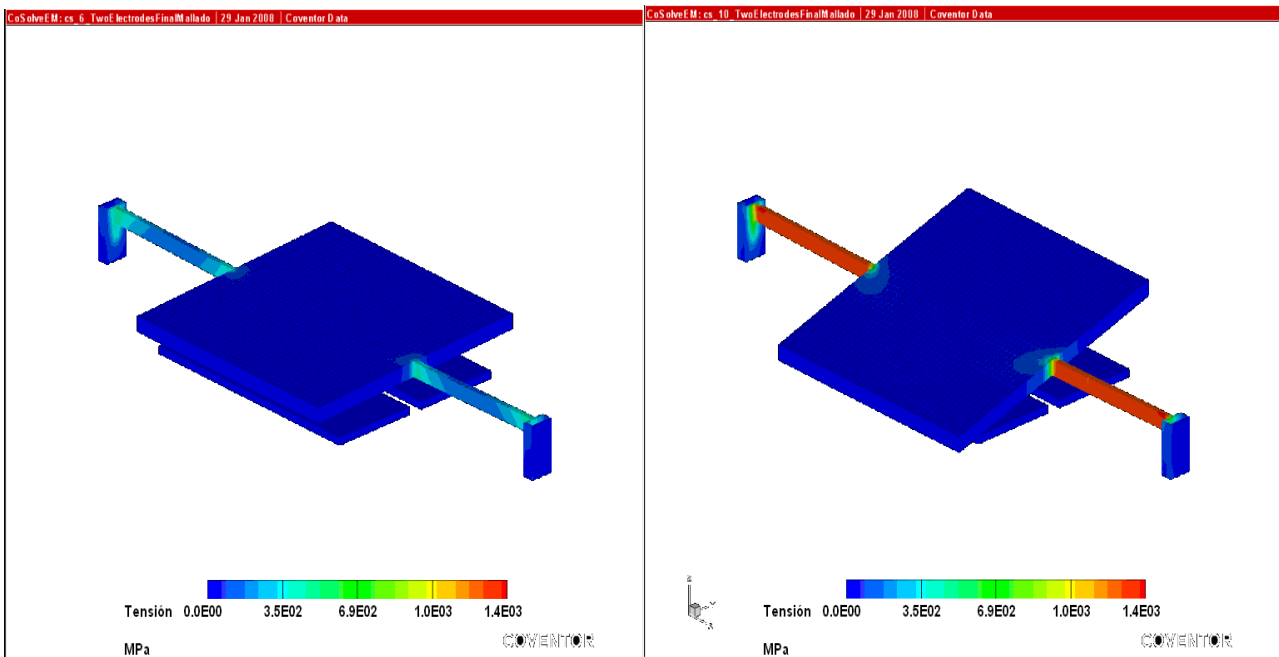


Figura 4.23 Ejemplo de la fuerza ejercida sobre las vigas en mínimo y máximo voltajes.

En la siguiente gráfica (figura 4.24) se observa el aumento de la magnitud del voltaje en el electrodo 1 y cómo éste afecta la magnitud de la fuerza que se aplica en las vigas torsionales del microespejo, de tal modo que a voltaje máximo se tiene máxima fuerza de torsión y para lo cual hay que verificar que no se vayan a romper a este voltaje dado.

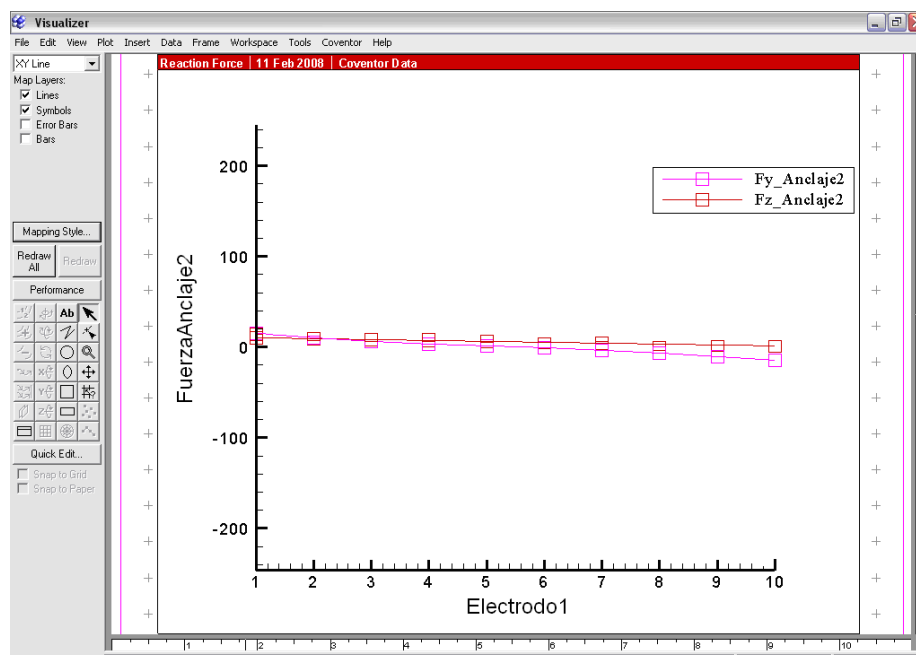


Figura 4.24 Comportamiento de la fuerza de reacción que presenta una viga torsional al aplicar voltaje de atracción en un electrodo

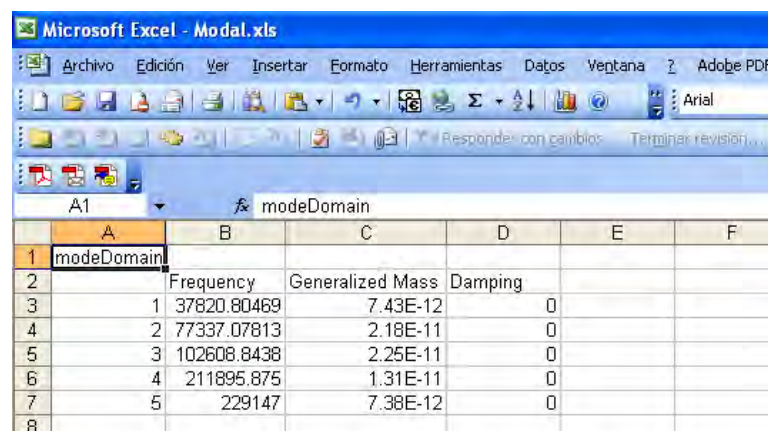
#### 4.4.1.4 Resultados de la Simulación de Modos de Frecuencia de Vibración.

De igual forma, se realizó un análisis de modal para determinar las frecuencias de vibración que sufre el microespejo bajo la condición ideal de amortiguamiento, y se puede observar en la tabla 4.6, los resultados de las diferentes frecuencias obtenidas para 5 modos de vibración que podría presentar el microespejo, con una condición de amortiguamiento ideal, obtenidos en Coventor.

Así la tabla 4.6, arroja que los valores de frecuencias más comunes de vibración que podría presentar el microespejo en su conjunto, es de 37820.8 Hz, para el modo vibracional 1, de 77337.07 Hz para el modo vibracional 2 y 102608.84 Hz para el modo vibracional 3 (que serían los modos de vibración más comunes que podría presentar el microespejo).

La figura 4.25 muestra el modo vibracional 1, la figura 4.26 muestra el modo vibracional 2 y la figura 4.27 muestra el modo vibracional 3, donde en cada figura, las partes coloreadas de rojo presentan mayores desplazamientos por vibración y las que no presentan ninguno están coloreadas de azul.

Tabla 4.6 Resultados de las frecuencias para 5 diferentes modos de vibración del microespejo.



	A	B	C	D	E	F
1	modeDomain					
2		Frequency	Generalized Mass	Damping		
3	1	37820.80469	7.43E-12	0		
4	2	77337.07813	2.18E-11	0		
5	3	102608.8438	2.25E-11	0		
6	4	211895.875	1.31E-11	0		
7	5	229147	7.38E-12	0		
8						



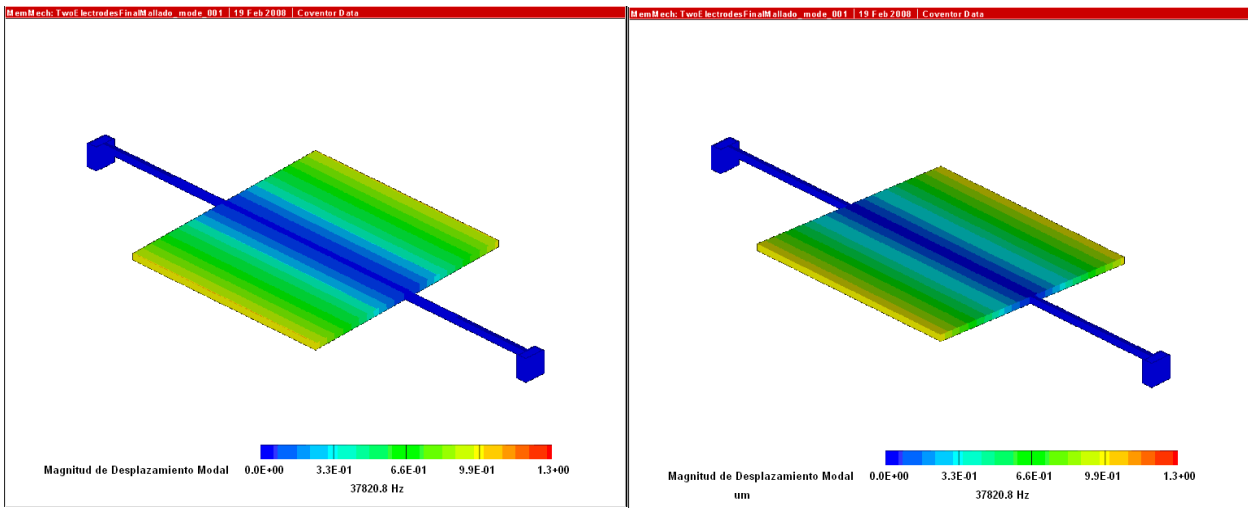


Figura 4.25 Ejemplo del primer modo de vibración del microespejo a 37820.8 Hz .

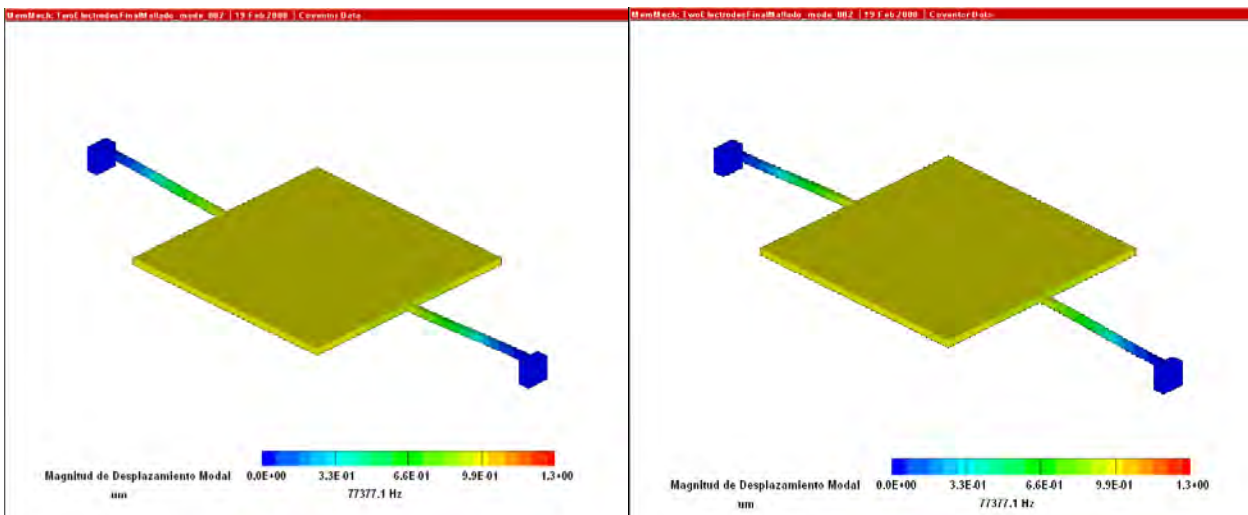


Figura 4.26 Ejemplo del segundo modo de vibración del microespejo a 77377.07 Hz

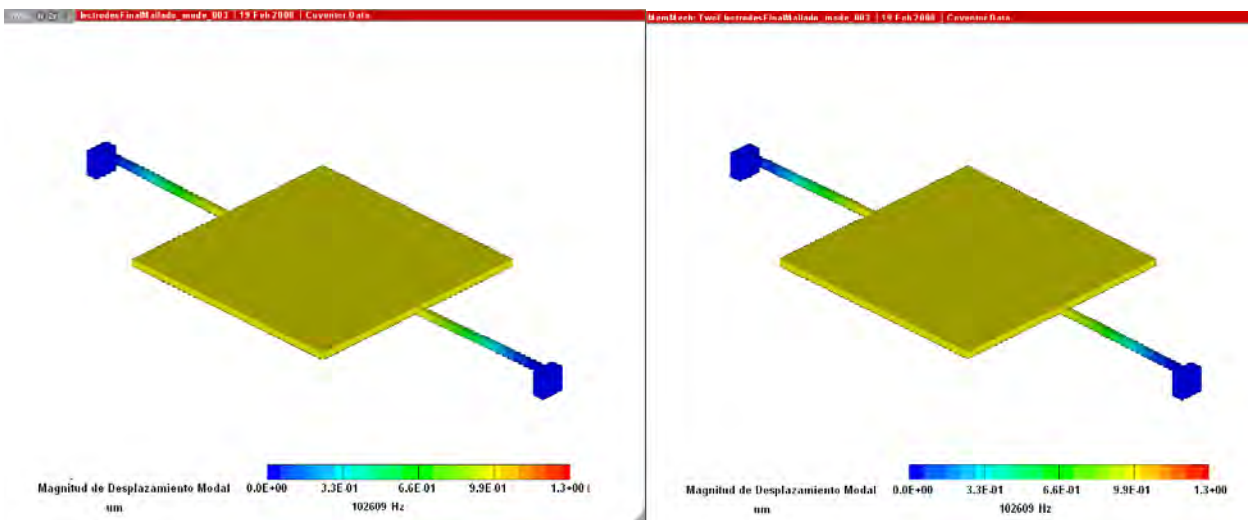


Figura 4.27 Ejemplo del tercer modo de vibración del microespejo a 102608.84 Hz.

## CAPÍTULO V

### Análisis De Resultados

#### 5.1 Propiedades del Polisilicio

En aplicaciones que requieren de micromaquinado, se utilizan películas delgadas de silicio como material estructural y, como es difícil construir dichas películas de un solo cristal de silicio, los dispositivos se fabrican a partir de silicio policristalino mejor conocido como polisilicio.

Las propiedades mecánicas de las películas de polisilicio dependen mayormente del proceso utilizado en la deposición. La tensión residual puede controlarse casi completamente variando la presión y la temperatura de deposición, como se muestra en la figura 5.1.

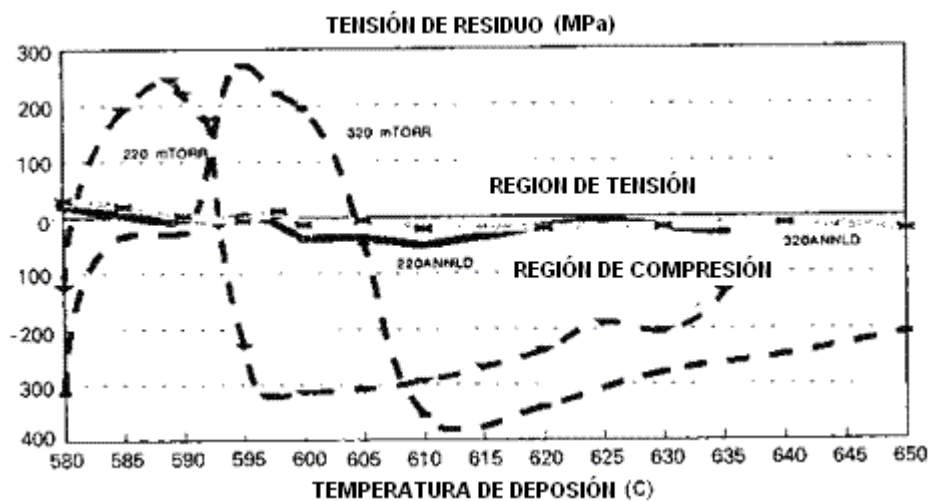


Figura 5.1 Gráfico de la tensión residual

La fuerza del polisilicio es menos conocida. Diferentes investigadores han reportado valores del módulo de Young en rangos de entre 140 y 210 Gpa, que dependen de la estructura cristalina y su orientación. Sin embargo, recientes investigaciones indican que el módulo de Young depende en gran medida de las condiciones de deposición. Las películas delgadas también dependiendo de su orientación, muestran una gran susceptibilidad a la temperatura.

Dado que una película delgada ideal no debe mostrar ninguna dependencia en sus características mecánicas, los investigadores han encontrado que la deposición de películas delgadas a 590 °C, que es la temperatura de transición entre el polisilicio y el silicio amorfo, es un método efectivo para producir películas de polisilicio isotrópicas. A esta temperatura el silicio amorfo se re-cristaliza durante la alineación, lo que produce películas con un módulo de Young casi uniforme de 165 GPa.

En materiales policristalinos la fuerza de fractura depende de dos factores, del tamaño de la oblea  $d$ , y la energía superficial de fractura  $\gamma_s$ . Esto proviene del hecho de que el tamaño de una dislocación es generalmente gobernado por el tamaño de la oblea, que, por la ecuación de Griffith, muestra que la fuerza de fractura de este material es:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{4E\gamma_s}{\pi d}} \quad (5.1)$$

Donde  $\sigma_f$  es el esfuerzo de la placa,  $d$  es el tamaño de la grieta y  $E$  es el módulo de Young.

Como se muestra en la ecuación, la fuerza de fractura es también dependiente de la energía superficial de fractura,  $\gamma_s$ . Para granos de policristales pequeños, la energía necesaria para fracturar la superficie del grano incrementa proporcionalmente al tamaño del grano. Como consecuencia, granos más grandes serán más fuertes debido a la energía creciente necesaria para generar una grieta a través del material.

En varios estudios, la fuerza media de fractura del polisilicio se encuentra entre 2 a 3 GPa. Diversas investigaciones han arrojado que en diferentes muestras de fracturas del polisilicio, tienen un módulo de Weibull similar al del silicio monocristalino, que indicaría una confiabilidad similar para los dos materiales.

La siguiente tabla lista las propiedades físicas principales del polisilicio, las cuales se tomaron como parámetro de diseño y validación del modelo.

Tabla 5.1 Propiedades físicas del polisilicio

Propiedad	Valor
Densidad	2330 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	753 J/kg C
Conductividad térmica	125 W/m K
Módulo de Young	<b>169 +/- 6 GPa</b>
Fuerza de elasticidad	0.22 +/- 0.01
Relación de Poisson	1.20 +/- 0.15 GPa
Coefficiente de expansión elástica	9.4 x 10 <sup>-6</sup> / C

## 5.2 El ángulo de Inclinación y la Linealidad

En el capítulo anterior se pueden observar los resultados que se obtuvieron de la curva de transferencia de ángulo-voltaje, que tiene un comportamiento lineal, de este modo, como se declaró anteriormente, la ventaja principal de este microespejo es que puede alcanzar ángulos lineales de escalamiento, además de que para obtener esos ángulos, la placa del microespejo no correrá el riesgo de chocar con la superficie de nitruro que sostiene al sistema.

Obtener un comportamiento lineal fue posible al aplicar escalones de voltaje de aumento constante a los electrodos individualmente activados. De tal modo, que en el primer electrodo se aplicó una diferencia de voltaje mínima, la cual fue incrementando hasta llegar a un valor máximo; mientras que en el segundo electrodo, se realizó lo mismo pero a la inversa, es decir, se inició con un voltaje máximo el cual disminuyó hasta llegar a un valor mínimo.

El precio más grande que se debe de pagar es que para obtener una relación lineal entre el ángulo y el voltaje, es el control simultáneo de incremento de voltaje en el primer electrodo y de disminución de voltaje en el segundo, además que se tiene que comenzar con un valor absoluto de voltaje idéntico en ambos electrodos, para evitar vibraciones indeseables y desestabilización del sistema.

De esta manera, con la finalidad de implementar una estrategia de control en el circuito de accionamiento, se necesitan circuitos divisores de voltaje que puedan utilizarse para proporcionar voltajes lineales de escalamiento a los electrodos. De tal modo que, si lo que se requiere es un ángulo de inclinación determinado, se puede recurrir a este sistema de control y aplicar los valores de voltaje predeterminados en cada electrodo, para cada ángulo.

Sin embargo, si el dispositivo es controlado utilizando un circuito de accionamiento con incremento y/o disminución de voltaje constantes, se pueden lograr ángulos de inclinación de valores intermedios a los obtenidos al aplicar los escalones de voltaje. Esto significa que la resolución del ángulo de inclinación es superior que en modo de escalones de voltaje.

Otra ventaja que tiene el diseño del microespejo torsional propuesto, es que a valores máximos de voltaje se obtuvieron valores de ángulos máximos de inclinación de  $43.130^\circ$ , lo que aumenta la capacidad de reflexión de los haces lumínicos que lleguen a la superficie del espejo y por tanto, al contar con una amplia gama de valores de voltaje, la resolución del microespejo aumenta.

### 5.3 Modos de Vibración

En el capítulo 3 se definieron las ecuaciones para la frecuencia de vibración del microespejo y sus vigas torsionales.

Por tanto, se tiene que define que la masa de la placa central  $M$  se define por:

$$M = 2\rho Wt(P_M - l_v)$$

$$M = 2(2330 * 10^3)(300 * 10^{-6})(2 * 10^{-6}) \left( \left( \frac{600 * 10^{-6} + 200 * 10^{-6}}{2} \right) - 100 * 10^{-6} \right) = 0.839 * 10^{-6} \text{ kg}$$

Donde  $\rho$  es la resistividad del material y si la estructura está hecha de silicio, entonces  $\rho=2330 \text{ Kg/m}^3$  y  $P_M=(l+L)/2$ , que es el punto medio del largo total de la estructura del microespejo torsional

De igual modo, de la ecuación 3.42 de frecuencia de vibración de la estructura se desprende que

$$\omega = \sqrt{\frac{2Ewt^3}{MI_v^3}} = \sqrt{\frac{2(165 * 10^9)(2 * 10^{-6})(2 * 10^{-6})^3}{(0.839 * 10^{-6})(100 * 10^{-6})^3}} = \sqrt{\frac{5.28 * 10^{-12}}{8.39 * 10^{-19}}} = 2508.626 \text{ Hz}$$

Donde  $E$  representa al módulo de Young,  $t$  y  $w$  son el grosor de las vigas y la placa respectivamente.

Por lo tanto, dados los resultados de las frecuencias obtenidas en la simulación se puede observar que están por debajo de los valores permitidos de frecuencias de vibración, por lo que el microespejo no entrará en frecuencia de resonancia que origine fallas catastróficas en el sistema.

### 5.4 El Modelo Físico

Para la construcción del modelo físico, se utilizó el software de diseño L-Edit en el cual se detalló el proceso PolyMUPMS de las máscaras que efectivamente se utilizaron en la construcción del modelo físico y se muestran a continuación en la figura 5.2, donde los cuadros grandes son los cojincillos para conectar el dispositivo.

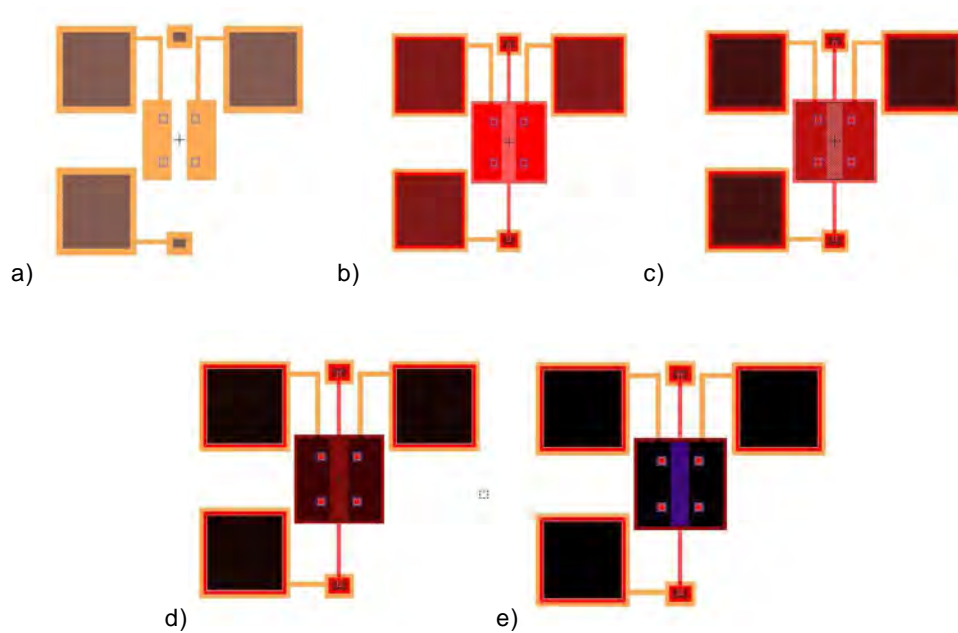


Figura 5.2 a) Cojincillos de conexión y los electrodos (Poli 0)  
 b) Anchor 1 c) Poli 1 d) Poli 2 e) Metal

La siguiente figura (5.3) muestra el modelo tridimensional del microespejo que fue mandado a construir a los laboratorios MEMSCAP.

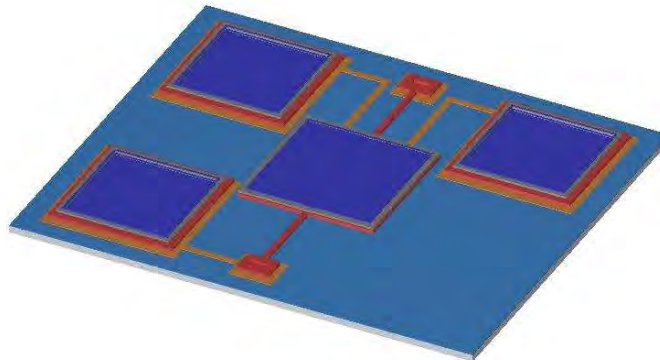


Figura 5.3 Modelo del microespejo torsional listo para construir

En la figura 5.4 se muestra el dado de 1 cm x 1 cm que fue mandado a construir. En él hay microespejos de pistón, torsionales, deformables y vigas. Del lado derecho se puede apreciar un banco de microespejos torsionales como el que se propuso en este trabajo, sin embargo para efectos de caracterización, el microespejo torsional propuesto es el que se muestra con el círculo blanco.

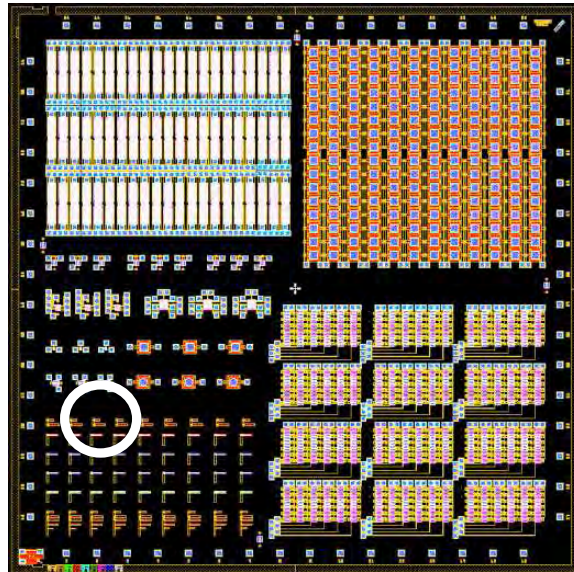


Figura 5.4 Dado construido por proceso PolyMUMPS

Finalmente, la imagen ampliada del microespejo torsional físico es la que se muestra a continuación (ver figura 5.5), en ella se pueden apreciar los cojincillos de conexión para los electrodos y para el microespejo, las vigas torsionales y los anclajes de las vigas.

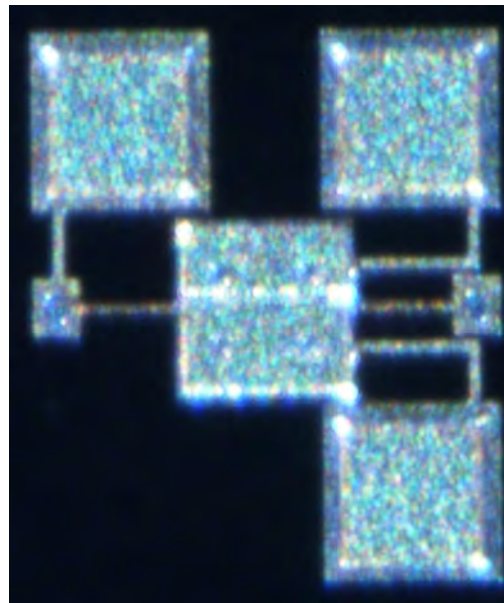


Figura 5.5 El microespejo torsional propuesto ya construido.

Aparentemente, en esta imagen, la superficie del microespejo toca uno de los cojincillos de conexión, sin embargo esto se debe a un reflejo de la luz sobre la superficie del microespejo, sin que ello llegue a afectar de modo alguno el comportamiento del mismo.

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, este trabajo no abarca la parte de caracterización del microespejo físico, únicamente su diseño y simulación





## **CAPÍTULO VI**

### **Conclusiones**

Después de haber realizado las simulaciones, haber obtenido los resultados y realizado el análisis de los mismos, se comprobó que las vigas torsionales del modelo de microespejo torsional propuesto, al flexionarse bajo la fuerza de atracción ejercida por el voltaje máximo aplicado, no sufren fractura ni total y/o parcial.

Respecto a la resistencia del material, en particular para el caso de las vigas torsionales, el análisis del módulo de Young obtenido en la simulación, demuestra que el polisilicio utilizado para su fabricación, proporciona la resistencia y flexibilidad necesarias para el correcto funcionamiento de las vigas.

Otro aspecto importante en el desempeño del microespejo, es que el diseño-basado en la tecnología de micromaquinado PolyMUMPS- y el método de control propuestos, garantizan que la placa reflejante no toque ni choque con el sustrato, evitando así los efectos de caída instantánea y/o adhesión momentánea.

Esto arroja que efectivamente, el método fabricación de elegido (PolyMUMPS) resulta barato y sencillo, y lo hace una opción confiable para lograr los objetivos propuestos al inicio de este trabajo.

Con estos resultados, también se validó que el modelo del microespejo torsional propuesto presenta linealidad electrostática, es decir, el voltaje y los ángulos obtenidos al girar el microespejo, son linealmente proporcionales.

Lo anterior significa que a un valor de voltaje relativamente bajo, las vigas se podrán flexionar y con ello hacer girar la placa reflejante del microespejo un rango amplio de ángulos de torsión, sin que con ello el usuario tenga que preocuparse por no lograr un ángulo deseado -que se incluya dentro del rango de movimiento del microespejo-, debido a la probable fractura del material.

Para alcanzar esta característica de transferencia se utilizó el método de control propuesto –aumentando voltaje en un electrodo y disminuyendo el del otro proporcionalmente-, de tal modo que el microespejo es capaz de alcanzar diferentes ángulos conforme los valores de voltajes aplicados varían de modo lineal. Esta característica de linealidad en el cambio de potencial entre los electrodos, garantiza el comportamiento de un microespejo torsional con ángulos de escalamiento lineales, bajo las condiciones de diseño y control propuestos.

Además se comprobó que la respuesta a los diferentes modos de frecuencia a los que se sometió el modelo, se encuentra dentro de un rango seguro de funcionamiento, lo

que garantiza un desempeño sin vibraciones peligrosas que comprometan la estructura del espejo en funcionamiento.

Por tanto, los resultados obtenidos validan el funcionamiento físico del microespejo, en los cuatro aspectos principales que se plantearon en esta tesis: la resistencia del material, los efectos de adhesión momentánea y caída instantánea, la relación de linealidad entre ángulo-voltaje y las condiciones de modos de amortiguamiento de frecuencias.

Al haber obtenido todas estas características de diseño, que hacen del microespejo torsional propuesto un modelo práctico, seguro y barato para lograr ángulos de movimiento bastante exactos, se puede afirmar que son válidas para el caso de los objetivos planteados en esta tesis que es simular el movimiento de un espejo deformable basado en espejos torsionales.

Esto es totalmente posible, dado que se pueden lograr ángulos más pequeños si en vez de aplicar diferencias de voltaje en unidades de Volt, se pudieran aplicar en ambos electrodos una diferencia fraccionaria. Por tanto, debido a la linealidad electrostática del sistema, se pueden obtener ángulos más pequeños y exactos, si es que el usuario así lo requiriera.

Al obtener este tipo de ángulos más pequeños, se puede entonces plantear el desarrollo de una matriz de microespejos, los cuales al ser accionados independientemente y bajo las condiciones de control propuestas, puedan lograr -en conjunto- ángulos similares a los que se obtienen con la deformación de la membrana de un microespejo deformable.

De esta manera, el objetivo de lograr emular el comportamiento de un microespejo deformable utilizando únicamente microespejos torsionales, puede alcanzarse de un modo más sencillo, sin necesidad de comprometer la resolución del microespejo y logrando un control de la “membrana” (matriz de microespejos) mucho más exacto.

Este nuevo microespejo “deformable”, además puede aumentar su resolución entre mayor sea el número de microespejos torsionales con los que cuente dicha matriz, sin embargo contaría con la desventaja de que a mayor número de microespejos torsionales, mayor será la superficie que utilizaría el dispositivo en su conjunto, además de que el control de una cantidad muy grande de microespejos accionados individualmente, se complicaría en extremo.

Sin embargo y como se estableció en un principio de este trabajo, las características de diseño de esta matriz, no fueron abordadas puesto que únicamente se validó el modelo que servirá como base para este otro objetivo -en un trabajo posterior-, el cual incluiría la caracterización del modelo físico ya construido.

---

## BIBLIOGRAFÍA

### Capítulo I

- ❖ Thomas G. Bifano, Julie Perreault, Raji Krishnamoorthy Mali, and Mark N. Horenstein “Microelectromechanical Deformable Mirrors”, Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics, Vol. 5, No. 1, pp 83-89, 1999.
- ❖ Long-Sheng Fan, Yu-Chong Tai, Richard S. Muller, “Integrated Movable Micromechanical Structures For Sensors Y Actuators” IEEE Transactions on Electron Devices. Vol 15 No 6. 1988
- ❖ M. H. Miller, J. A. Perrault, G. G. Parker, B. P. Bettig Y T. G. Bifano, “Simple models for piston-type micromirror behavior”, Journal Of Micromechanics And Microengineering, pp 303-313, 2006
- ❖ Hongjun Zeng, Alan D. Feinerman, Zhiliang Wan, Y Pancham R. Patel, “Piston-Motion Micromirror Based On Electrowetting Of Liquid Metals”, Journal Of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, No. 2, 2005
- ❖ Long-Shen Fan, Yu-Chong Tai Y Richard S. Muller. “Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators”, IEEE Transactions On Electron Devices. Vol 15 No 6, pp 724- 730, 1988
- ❖ Siraj A. Sayeed Y Kevin M. Walsh, “Electrostatic Deformable Devices Using Surface Micromachining”, IEEE Journal, pp 596-602, 1996
- ❖ Kinoshita, Hoshino, Matsumoto, Y Shimoyama, “Thin Compound Eye Camera With A Zooming Function Byreflective Optics”, IEEE Journal, pp 235-238, 2005
- ❖ F. Hugo Ramírez Leyva, “Aplicaciones Y Tendencias De Los Sistemas Microelectro Mecánicos (Mems)”, Instituto De Electrónica Y Computación
- ❖ D. Lee, U. Krishnamoorthy, K. Yu, O. Solgaard, “Single-Crystalline Silicon Micromirrors Actuated By Self-Aligned Vertical Electrostatic Combdrives With Piston-Motion Y Rotation Capability”, Disponible en línea en la página de Elsevier [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2003
- ❖ Xingguo Xiong, Tim Dallas, Shubhra Gangopadhyay, Jordan Berg, “Design Y Simulation Of Aluminum Bi-Functional Spatial Light Modulator”, IEEE Journal, pp 159-162, 2005
- ❖ Z. Marcet Y H. B. Chan, “Prototype MEMS Piston Mirror Array For Pulse Shaping In UV”, Disponible en línea en la página de Elsevier [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2004
- ❖ Hongbin Yu, Haiqing Chen, Y Sai Fu, “Versatile Micromirror With A Multimovement Mode”, Applied Optics Vol. 44, No. 7 pp 1178-1181, 2005.
- ❖ Hiroshi Toshiyoshi “An Overview Of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)”, Institute of Industrial Science, disponible en Hiroshi@ee.ucla.edu

## Capítulo II

- ❖ Dr. J-B. Lee, "Introduction To MEMS", Power Point presentation
- ❖ W. Piyawattanametha, L. Fan\*, S. S. Lee, John G. D. Su Y Prof. M. C. Wu, "MEMS Technology For Optical Crosslink For Micro/Nano Satellites", International Conference On Microelectronics, Vol 1, 2000
- ❖ Antonio Luque Estepa "Procesos De Fabricación", Dpto. Ingeniería Electrónica, disponible en línea en [www.emerald.com](http://www.emerald.com)
- ❖ Marc J. Madou, "Fundamentals Of Microfabrication", CRC Press, 1997
- ❖ Marc J. Madou, "Surface Micromachining: Processes Y Materials", 13 MSE 2001
- ❖ Tianhong Cui, "Surface Micromachining", Mechanical Engineering
- ❖ Adisorn Tuantranont Y Victor M. Bright, "Introduction To Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) With Emphasis On Optical Applications", Technical Journal, Vol.1 N°6, pp 227-236, 2000
- ❖ Gregory T. A. Kovacs, Nadim I. Maluf, Y Kurt E. Petersen, "Bulk Micromachining of Silicon", Proceedings Of The Ieee, Vol. 86, No. 8, pp 1536-1551, 1998.

## Capítulo III

- ❖ Minhang Bao, "Analysis design principles of MEMS devices", Fudan University, Shanghai, China, 2004
- ❖ Ofir Degani, Eran Socher, Ariel Lipson, Tomer Leitner, "Pull-In Study Of An Electrostatic Torsion Microactuator"
- ❖ Ville Kaajakari, "MEMS Tutorial: Pull-In Voltage In Electrostatic Microactuators", 2002
- ❖ Bernard Legry, D. Collard, "Electrostatic Actuation Of Electromechanical Resonators",
- ❖ CNRS-IEMN Lille (France), Silicon MEMS Group, [www.isen.fr/Recherche/Microsystem](http://www.isen.fr/Recherche/Microsystem)
- ❖ J.-M. Huang, A.Q. Liub, Z.L. Denga, Q.X. Zhangc, "A Modeling Y Analysis Of Spring-Shaped Torsion Micromirrors For Low-Voltage Applications", International Journal Of Mechanical Sciences 48 (2006) 650-661
- ❖ J.-M. Huang, A.Q. Liu A,\*, C. Lub, J. Ahna, "A Mechanical Characterization Of Micromachined Capacitive Switches: Design Consideration Y Experimental Verification", Sensors Y Actuators 108 (2003) 36-48
- ❖ X.M. Zhang, F.S. Chau, C. Quan, Y.L. Lam, A.Q. Liu "A Study Of The Static Characteristics Of A Torsional Micromirror", 2000
- ❖ "Capacitance", Pp182-191 HW#5: Ch4: 37-55odd

## Capítulo IV

- ❖ Coventor Ware 2006, "Using Coventor Ware", [www.coventor.com](http://www.coventor.com)

## Capítulo V

- ❖ B. H. Stark, M. R. Dokmeci, and K. Najafi, "Improving Corrosion-Resistance of Polysilicon Using Boron Doping and Self-Induced Galvanic Bias". Capítulo 4 pp. 295-301, 2003.
- ❖ Jin-Chern Chiou Y Yu-Chen Lin, "A Multiple Electrostatic Electrodes Torsion Micromirror Device With Linear Stepping Angle Effect", Journal Of Microelectromechanical Systems, Vol. 12, No. 6, 2003
- ❖ Jian-Gang Guo, Ya-Pu Zhao, "Dynamic Stability Of Electrostatic Torsional Actuators With Van Der Waals Efect", (LNM), Institute Of Mechanics, Chinese Academy Of Sciences, 2005
- ❖ William N. Sharpe, Jr., Bin Yuan, and Ranji Vaidyanathan, "Measurements Of Young's Modulus, Poisson's Ratio, And Tensile Strength Of Polysilicon", IEEE Journal, 1997.