



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARACTERIZACIÓN DE MEMS USANDO  
EL ANALIZADOR DE MICROSISTEMAS  
MSA-400**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

PRESENTAN:  
**SILVIA LÓPEZ PORTELA**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. JOSÉ ISMAEL MARTÍNEZ LÓPEZ**



MÉXICO, D.F.

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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

*A mi familia y amigos.*

*Silvia López Portela*

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>i</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>LOS MICROSISTEMAS ELECTROMECÁNICOS (MEMS)</b>	<b>3</b>
1.1 Breve Historia de los MEMS	4
1.2 Tecnologías de Micro fabricación de MEMS	5
1.2.1 Micro maquinado	6
1.2.1.1 Micro maquinado de volumen (Bulk Micromachining)	6
1.2.1.2 Micro maquinado de superficie (Surface Micromachining)	7
1.2.1.3 Proceso LIGA	7
1.2.1.4 Proceso PolyMUMP's	9
1.3 Aplicaciones de los MEMS	12
1.4 Estado de Arte de los MEMS	15
1.5 Bibliografía y Referencias	19
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL MSA-400 PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA Y MOVIMIENTO DE LOS MEMS</b>	<b>21</b>
2.1 Interferometría	22
2.1.1 Breve Historia de la Interferometría	22
2.1.2 Interferómetros de frente de onda dividida	24
2.1.3 Interferómetros de amplitud de onda dividida	25
2.1.4 Interferencia	26
2.1.5 Coherencia	27
2.2 Configuraciones de los interferómetros	31
2.2.1 Interferómetro de Michelson	32
2.2.2 Interferómetro de Mirau	33
2.2.3 Interferómetro de luz blanca de escaneo vertical	35
2.3 El estroboscopio	36
2.3.1 Microscopio con video estroboscópico	37
2.4 El vibrómetro y el Efecto Doppler	37
2.4.1 El vibrómetro de láser Doppler	39

2.5	Bibliografía y Referencias	41
-----	----------------------------	----

### **CAPÍTULO 3**

#### **EL ANALIZADOR DINÁMICO DE MICROSISTEMAS ELECTROMECAÑICOS**

<b>MSA-400</b>		<b>43</b>
3.1	El analizador de Microsistemas MSA-400 del Centro UNAMems	44
3.1.1	Descripción general del analizador MSA-400	44
3.2	Caracterización de MEMS	45
3.2.1	Topografía de los MEMS	45
3.2.2	El Sistema de Medición Topográfica (TMS)	46
3.2.2.1	Teoría de la interferometría de la luz blanca	47
3.2.2.2	Interferómetro de luz blanca de Michelson	48
3.2.2.3	Microscopios con interferómetros de luz blanca	50
3.2.2.4	Relación entre ancho espectral y longitud coherente	51
3.2.2.5	Cálculo de la “envolvente máxima”	54
3.2.2.6	Método de la evaluación de fase	55
3.3	Caracterización dinámica de los MEMS dentro del plano	56
3.3.1	El Analizador de Movimiento dentro del plano (PMA)	57
3.3.1.1	Máquina de visión estroboscópica	58
3.3.1.2	Parámetros importantes del sistema	59
3.4	Caracterización dinámica de los MEMS fuera del plano	60
3.4.1	El Vibrómetro de Micro escaneo (MSV)	60
3.4.1.1	La vibrometría con láser Doppler	61
3.4.1.2	Principios de la vibrometría con láser Doppler	61
3.5	Bibliografía y Referencias	66

### **CAPÍTULO 4**

#### **CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DE LOS MEMS**

4.1	Caracterización estática de los MEMS	67
4.1.1	Topografía de los MEMS	68
4.1.1.1	Actuador electro térmico en V	69
4.1.1.2	Engrane	72
4.1.1.3	Logo Pumas	74

<b>4.2</b>	<b>Caracterización dinámica de los MEMS</b>	<b>76</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterización dinámica dentro del plano</b>	<b>76</b>
<b>4.2.1.1</b>	<b>Actuador electro térmico en V</b>	<b>77</b>
<b>4.2.1.2</b>	<b>Hot Arm</b>	<b>85</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Caracterización dinámica fuera del plano</b>	<b>88</b>
<b>4.2.2.1</b>	<b>Resonador MEMS</b>	<b>88</b>
<b>4.2.2.2</b>	<b>Resonador 1</b>	<b>93</b>
<b>4.2.2.3</b>	<b>Resonador 2</b>	<b>97</b>
<b>4.2.2.4</b>	<b>Resonador 3</b>	<b>99</b>
<b>4.3</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>101</b>
<b>4.4</b>	<b>Bibliografía y Referencias</b>	<b>102</b>

## INTRODUCCIÓN

Hace algunos años se filmó una película en la que un equipo de científicos tenía que viajar al interior del cuerpo humano para sanarlo antes de que los anticuerpos lo destruyera. Esto lo logran con una máquina que encoje los átomos y los reduce a micro escala, viajando en un micro submarino a través del torrente sanguíneo. En 1966, cuando se filmó dicha película (*Fantastic Voyage*) el hecho de poder reducir o fabricar un micro submarino simplemente era hablar de ciencia ficción, sin embargo, lo que poca gente sabía es que las bases para hacer posible el desarrollo de los microsistemas y las micromáquinas ya estaban dadas.

Dichas bases y motivación para lograr la miniaturización de sistemas y máquinas fueron inspiradas desde 1959 gracias a la célebre plática (*There's Plenty of Room at the Bottom: an Invitation to Enter a New Field of Physics*) del Físico estadounidense Richard Feynman conocido por muchos como el padre de la micro y nanotecnología.

A partir de entonces, el desarrollo de los Microsistemas Electromecánicos MEMS ha requerido de la investigación multidisciplinaria de las ciencias y de las ingenierías pues las aplicaciones son muy amplias y la obtención de un producto terminado tipo MEMS requiere de un ciclo de trabajo que va desde el diseño, la fabricación, la caracterización hasta el encapsulado del micro sistema. Lo que lleva a un estudio detallado para cada una de dichas etapas sin mencionar las características especiales de la tecnología necesaria para las etapas de fabricación, caracterización y encapsulado de los productos MEMS.

Cada una de las etapas son necesarias para la obtención de un producto terminado tipo MEMS, sin embargo, la etapa de caracterización se considera como crítica pues en ella se decide si el diseño inicial cumple con los requisitos necesarios, de lo contrario se tendrá que realizar una realimentación en el ciclo de desarrollo, haciendo un nuevo diseño en el que se modifiquen los parámetros necesarios que nos lleven a los rangos de operación requeridos.

Lo anterior implica distintos retos por superar, entre los que se encuentran el desarrollo de micro tecnologías no invasivas para las etapas de fabricación y caracterización, pues se requiere de la manipulación de los microsistemas MEMS sin que estos sean dañados.

Las micro tecnologías que se han desarrollado hasta el momento para la caracterización de los microsistemas MEMS están basadas en la interferometría óptica y en el efecto Doppler óptico que es precisamente la tecnología no invasiva necesaria.

Este trabajo tiene como objetivo el realizar la etapa de caracterización mecánica de una selección de MEMS fabricados bajo el proceso PolyMUMP's de MEMSCAP, haciendo uso de tecnologías ópticas no invasivas contenidas en una sola estación de trabajo llamada Analizador de Microsistemas MSA-400 desarrollado por la compañía Polytec.

Para lo anterior, este trabajo se ha dividido en 4 capítulos:

En el capítulo 1 se hace una introducción completa de los Microsistemas Electromecánicos desde sus inicios, pasando por las distintas tecnologías de micro fabricación, hasta el estado de arte de los MEMS.

En el capítulo 2 se revisa la tecnología no invasiva hasta ahora desarrollada para realizar la caracterización de los MEMS desde sus inicios hasta las últimas generaciones de dicha tecnología. En otras palabras, el capítulo 2 contiene los antecedentes de la tecnología que utiliza el analizador de Micro sistemas MSA-400 para la caracterización de los MEMS.

En capítulo 3 se explica de forma detallada las características del Analizador de Micro sistemas MSA-400, por lo que el capítulo fue dividido en las tres configuraciones del MSA-400: el Sistema de Medición Topográfica, empleado para la caracterización estática; el Analizador de Movimiento sobre el plano y El Vibrómetro de Micro escaneo, para la caracterización dinámica fuera del plano de los MEMS.

El capítulo 4 se refiere a la caracterización estática y dinámica de una selección efectuada de MEMS, explicando el principio de funcionamiento de cada uno de los MEMS y reportando los resultados obtenidos.

Finalmente, se presentan las conclusiones generales del presente trabajo.

## **CAPÍTULO 1**

### **LOS MICROSISTEMAS ELECTRO MECÁNICOS (MEMS)**

El acrónimo MEMS resulta de las siglas en inglés Micro Electro-Mechanical Systems, adoptado por primera vez por un grupo de aproximadamente 80 aficionados, en Estados Unidos, a finales de 1980 [1]. En Europa, esta tecnología es llamada Microsystems Technology (MST).

Los Microsistemas Electro Mecánicos MEMS se refieren a dispositivos que tienen características especiales. Sus dimensiones son menores a 1 mm pero mayores a 1  $\mu\text{m}$ . Además, combinan componentes eléctricos y mecánicos, todo integrado en su mayoría, sobre una capa de sustrato de silicio, lo que hace posible el desarrollo de sistemas completos en un solo circuito para el desempeño de tareas específicas, con aplicaciones en muy diversos campos como las comunicaciones, la industria automotriz, las ciencias biológicas, la medicina, la instrumentación, el control, la robótica, y la industria aeroespacial, entre otras.

El desarrollo de los MEMS es totalmente multidisciplinario, pues las aplicaciones de estos dispositivos son tan amplias como campos de estudio existen. Esto se debe a que esta nueva tecnología brinda características superiores:

- Debido a sus dimensiones y tipo de material empleado para su construcción poseen bajo peso, alta resistencia, estabilidad térmica, pequeño tamaño y volumen
- Poseen altos niveles de desempeño, en cuanto a velocidad de respuesta, precisión, eficiencia y exactitud,
- Alto nivel de integración y seguridad,
- Bajo costo de producción por unidad,
- Bajos niveles de consumo de energía,
- Larga durabilidad,
- Sin costos de mantenimiento.

Así que, la tecnología MEMS, promete revolucionar casi cada producto, reuniendo la micro electrónica basada en el silicio con la micro mecánica, por lo

que, la micro ingeniería hará posible la realización de sistemas completos en un solo circuito.

La Micro electrónica puede ser pensada como el "cerebro" de un MEMS, permitiendo que la capacidad de toma de decisiones aumente en estos nuevos productos, pues los micro sensores recogen información del entorno a través de la medición de parámetros mecánicos, térmicos, biológicos, químicos, ópticos, magnéticos, etc. Una vez procesada dicha información, el sistema responde a través de los micro actuadores de movimiento, posicionamiento, bombeo, filtrado, según sea el caso.

MEMS es la tecnología que permitirá el desarrollo de productos inteligentes, aumentando la capacidad de cómputo micro electrónico con la ayuda de micro sensores y micro actuadores, que harán más amplio el espectro de nuevos diseños y aplicaciones.

### **1.1 Breve Historia de los MEMS**

En 1959, durante la reunión anual de la "American Physical Society", el físico Richard Phillips Feynman, con su célebre plática – "There's Plenty of Room at the Bottom: an Invitation to Enter a New Field of Physics" [2], abrió un nuevo camino para la investigación en el campo de la Física hacia escalas muy pequeñas (micro y nano), lanzando dos retos a la comunidad: el primero, la construcción de un motor eléctrico que fuera tan pequeño que cupiera dentro de un cubo de 1/64 de pulgada. Este premio de \$1,000 dólares ofrecidos por Feynman, lo ganó el ingeniero eléctrico William McLellan en noviembre de 1960. El segundo reto premiado con la misma cantidad de dinero, fue otorgado a Tom Newman en 1985, estudiante graduado de la Universidad de Stanford, por ser la primera persona en escribir la página inicial del libro de Charles Dickens "A Tale of Two Cities", sobre la cabeza de un alfiler utilizando un haz de electrones [3].

A partir de entonces, muchas universidades y laboratorios corporativos, e incluso industrias de producción en línea, iniciaron investigaciones para el desarrollo de los MEMS.

Sin embargo, no fue hasta 1964 que el primer dispositivo (transistor de compuerta resonante) tipo MEMS fue reportado oficialmente por H. C. Nathanson y sus colegas de Westinghouse [4].

Después de seis años, con la invención del microprocesador se desataría el interés por el desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación como la litografía, que más tarde aportarían un gran impacto en los métodos utilizados para la fabricación de MEMS.

El primer acelerómetro tipo MEMS fue desarrollado en 1979 por los investigadores de la Universidad de Stanford. Este tipo de micro acelerómetro se convertiría en el primer dispositivo MEMS comercialmente exitoso. En el año de 1998, cerca de 27 millones de micro acelerómetros fueron comercializados.

El interés por el desarrollo de la nano y micro tecnología se incrementó gracias a las aportaciones realizadas durante el periodo de 1980 a 1990. En 1982, el desarrollo del microscopio de escaneo por efecto túnel (scanning tunneling microscope), seguido por el desarrollo del microscopio de fuerza atómica (atomic force microscope) en 1986, hicieron posible la observación a nano y micro escalas.

En 1991, el descubrimiento del nanotubo de carbón y la nueva técnica para la producción de nanotubos desarrollada por Smalley en 1996, fueron los descubrimientos más importantes de este periodo.

En la actualidad, la variedad de dispositivos MEMS y sus aplicaciones se sigue incrementando continuamente.

## **1.2 Tecnologías de Micro fabricación de MEMS**

Existen dos componentes básicas de los MEMS y de la micro ingeniería: la micro electrónica (fabricación de circuitos integrados) y el micro maquinado (fabricación de micro estructuras de movimiento).

La electrónica de los circuitos integrados (CI) se puede fabricar usando métodos ya bien conocidos como CMOS y VLSI [5]. Sin embargo, para la fabricación de micro estructuras tridimensionales móviles, es necesario emplear otro tipo de tecnología. Dicha tecnología debe ser confiable y debe garantizar un bajo costo de producción.

Como ya es bien sabido, la materia prima para la fabricación de la electrónica es el dióxido de silicio, el cual, debe ser procesado para obtener obleas de silicio ultra puro. Las obleas tienen el grosor deseado y son pulidas a la perfección mediante técnicas químicas y mecánicas [5].

Las propiedades eléctricas y mecánicas de cada capa dependen de la orientación del silicio poli cristalino, de la concentración y tipo de impurezas utilizadas para el dopaje. Las principales etapas del proceso para la fabricación de circuitos integrados son: difusión, oxidación, deposición, enmascarado, litografía, grabado o ataque, dopado, deposición dieléctrica y metalización.

Los procesos utilizados hasta ahora para la fabricación de CI no cuentan con técnicas para la fabricación de micro estructuras móviles en tres dimensiones, por lo que, es necesario agregar nuevas técnicas a dichos procesos. Estas nuevas técnicas utilizadas para la fabricación de MEMS se llaman Micro maquinado de volumen y Micro maquinado de superficie y son compatibles con los procesos convencionales de fabricación de los CI.

### **1.2.1 Micro Maquinado**

El micro maquinado es la tecnología de grabado que permite la fabricación de micro estructuras móviles de tres dimensiones, se basa en las tecnologías de fabricación para CI. Esta técnica puede grabar diversos materiales como polisilicio, óxidos, nitruros, vidrios, polímeros, materiales orgánicos, compuestos de las familias III y IV, y metales.

El micro maquinado se puede realizar tanto con grabado húmedo como con grabado seco [5].

#### **1.2.1.1 *Micro maquinado de volumen (Bulk Micromachining)***

El Micro maquinado de volumen es una extensión de la tecnología de fabricación de los CI y permite la fabricación de estructuras móviles de tres dimensiones. El Micro maquinado de volumen de silicio utiliza técnicas de grabado seco y grabado húmedo en conjunto con máscaras de grabado (etch masks) y regiones de detención (etch stops) para la construcción de estructuras completas de los dispositivos MEMS sobre el sustrato de silicio, entre las que se incluyen: vigas voladizas, agujeros, surcos, formas piramidales y membranas.

Las dos razones más importantes que hacen de este proceso una tecnología de fabricación viable son:

1. Los grabantes utilizados para el grabado anisotrópico húmedo, como el hidróxido de potasio (KOH), realizan el grabado a lo largo de los planos definidos por el cristal de silicio (silicio mono cristalino).
2. Es posible la utilización de máscaras de grabado para proteger las estructuras que se desean conservar y de esta forma realizar un grabado selectivo; así mismo, se pueden hacer grabados de películas delgadas de metales como oro y cromo.

El inconveniente del Micro maquinado de volumen es que la geometría de la micro estructura queda definida por la orientación de los átomos de la estructura del silicio [6].

#### **1.2.1.2 Micro maquinado de superficie (Surface Micromachining)**

El micro maquinado de superficie consiste en la deposición, litografía y grabado por capas de materiales sobre el sustrato para la formación de micro estructuras. Las capas que se depositan pueden ser estructurales o de sacrificio. Las capas estructurales son las que tendrán movimiento y las capas de sacrificio pueden ser o no removidas para la liberación de las capas estructurales. Las capas estructurales tienen un grosor que va desde 0.1  $\mu\text{m}$  hasta 100  $\mu\text{m}$ , y se fabrican con materiales como: nitruros, polímeros, polisilicio y metales; siendo el polisilicio el más estable y resistente [6]. El material principal para la fabricación de las capas de sacrificio es el vidrio de fosfosilicato PSG.

El proceso en general de micro maquinado de superficie contiene tres tipos de elementos:

1. Un elemento de sacrificio
2. Un elemento de micro estructura
3. Un elemento aislador

El micro maquinado de superficie a diferencia del micro maquinado de volumen, permite la fabricación de micro estructuras más complejas.

#### **1.2.1.3 Proceso LIGA**

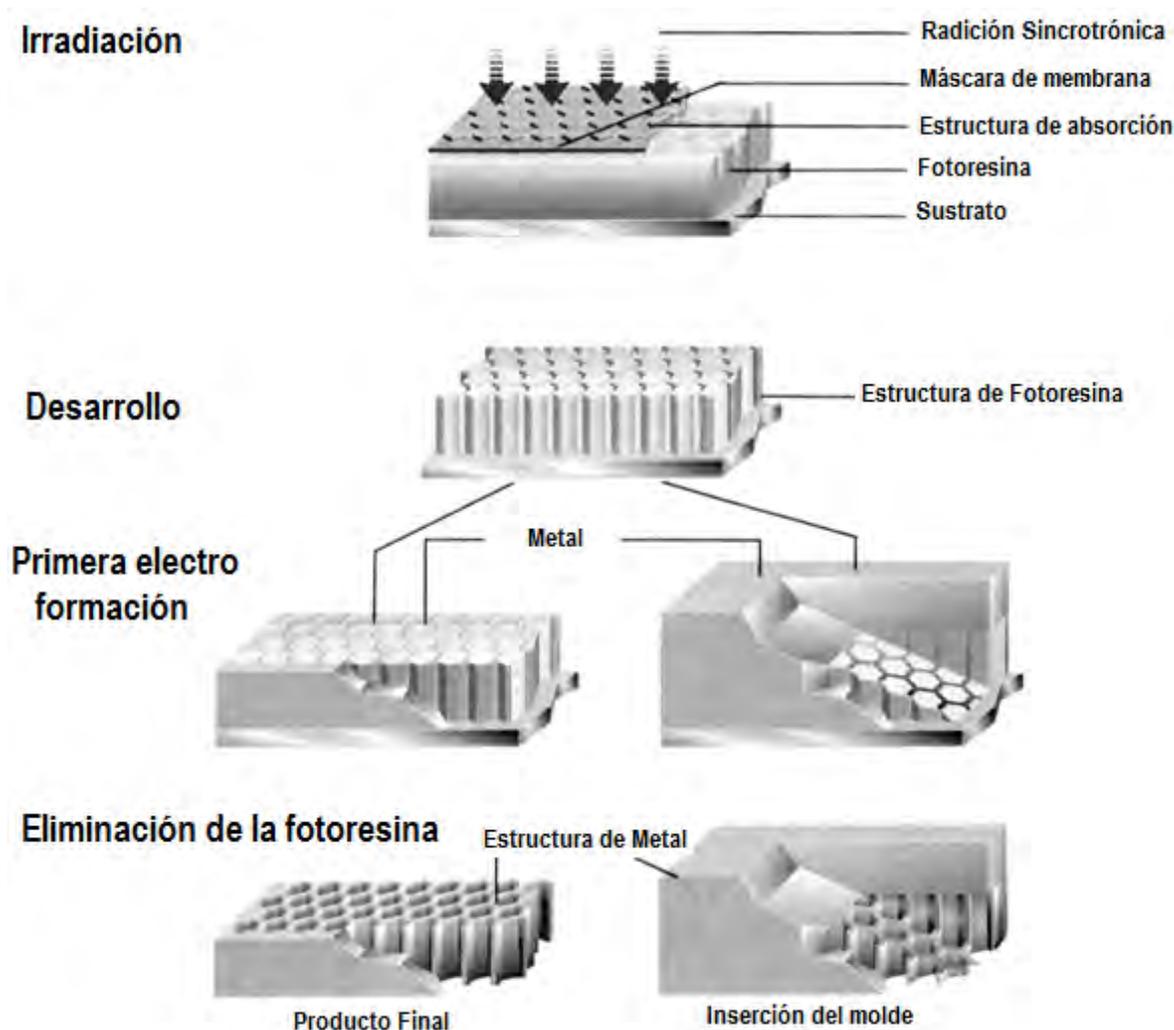
Como es de imaginarse, el micro maquinado requiere de un proceso de litografía muy fino y selectivo para poder realizar los moldes de las micro estructuras.

El proceso LIGA es el acrónimo alemán de X-ray Lithographie, Galvanoformung y Adformtechnik, es decir, litografía, electroformación y moldeado. Este proceso fue desarrollado en Alemania inicialmente fuera de la industria de los semiconductores, para la producción en masa de boquillas de tamaño micrométrico para enriquecer el Uranio 235, esto en la investigación de Física Nuclear [7].

Hoy en día, esta tecnología es utilizada para la producción de moldes micrométricos que permiten la construcción de las micro estructuras que conforman a los MEMS.

LIGA combina el proceso antiquísimo de moldes de cera conocido desde los egipcios con los procesos actuales de litografía de rayos X y la electrodeposición.

Este proceso consiste en poner una capa gruesa de material resistente a los rayos X con un a rango de grosor de micrómetros hasta milímetros. Después de haberse expuesto a radiación con rayos X, se obtiene una estructura resistente, tridimensional, o molde. Posteriormente, a través de la electrodeposición se rellena dicho molde con el material que se requiere para la micro estructura, este material puede ser: plástico, metal, cerámicas y sus combinaciones. Como producto final se obtienen las micro estructuras que conforman al Microsistema Electro mecánico (figura 1.1) [7].



**Figura 1.1.** Esquema del proceso LIGA.

LIGA ofrece una muy amplia variedad de formas tridimensionales de micro y sub micro escalas, que también pueden ser utilizadas para la producción del empaquetado de los MEMS.

Actualmente, este proceso sigue en investigación sobre todo para el perfeccionamiento y alta resolución de las micro estructuras.

#### 1.2.1.4 Proceso PolyMUMP's

PolyMUMP's fue desarrollado en el Centro de Sensores y Actuadores de Berkeley BSAC (*Berkeley Sensors and Actuators Center*) de la Universidad de California, durante las décadas de 1980 y 1990. El proceso salió al mercado en 1992 y desde entonces es el proceso estándar de micro maquinado de superficie para muchas industrias, ya que permite diseñar y probar los prototipos, acelerando sus procesos de desarrollo. A la fecha, el proceso ha

sido modificado para incrementar su flexibilidad y versatilidad en un ambiente multiusuario [8].

PolyMUMPs es un proceso de micro maquinado de superficie realizado sobre una oblea de silicio de 100 mm de diámetro, tipo n (100) y con resistividad de 1-2  $\Omega\text{cm}$ . Enseguida, se depositan 600 nm de nitruro de silicio  $\text{NB}_{3\text{B}}\text{SiB}_{4\text{B}}$  que actúa como aislante eléctrico entre la oblea y el circuito que se formará. Una vez que se ha depositado la capa aislante, se hace un depósito de 500 nm de polisilicio (Poly0), la cual es una capa fija al plano de tierra; dicha película es modelada mediante fotolitografía (primera máscara o nivel POLY0), y grabada para crear la estructura deseada.

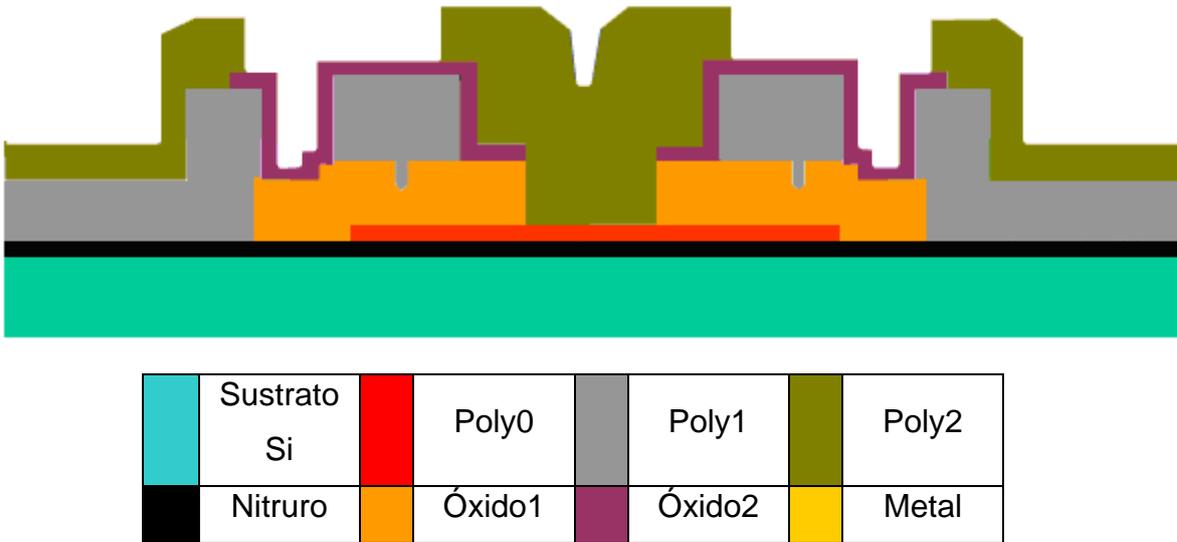
La siguiente capa es una capa de sacrificio de 2.0  $\mu\text{m}$  de PSG (primer óxido). Esta capa es removida al final del proceso. Dicha capa también es modelada por fotolitografía (nivel de máscara DIMPLE) y grabada con una profundidad de 0.75  $\mu\text{m}$ , con el propósito de crear *dimples*, que son pequeñas protuberancias para ayudar a reducir los voltajes de actuación o fenómenos de pegosidad entre las estructuras (*stiction*). Después del modelado y grabado de los *dimples*, se hace otro modelado (nivel de máscara ANCHOR1) con la finalidad de unir la próxima capa estructural (Poly1) al nitruro o al primer polisilicio (Poly0), posteriormente se hace el grabado.

El siguiente depósito es la primera capa estructural, se depositan 2.0  $\mu\text{m}$  de polisilicio (Poly1), se modela con procesos de fotolitografía (nivel de máscara POLY1), y se graba para crear el patrón deseado. Después de la primera capa estructural, se deposita la segunda capa de sacrificio: 0.75  $\mu\text{m}$  de PSG (segundo óxido). Esta capa es modelada utilizando dos niveles diferentes de máscara. El primer modelado (Nivel de máscara POLY1\_POLY2\_VIA), tiene el objetivo de unir la siguiente capa estructural (Poly2) al segundo polisilicio (Poly1), después del proceso de fotolitografía se hace el grabado correspondiente. El segundo modelado (Nivel de máscara ANCHOR2), tiene el objetivo de unir la siguiente capa estructural (Poly2) al nitruro o al primer polisilicio (Poly0), después del proceso de fotolitografía se hace el grabado correspondiente.

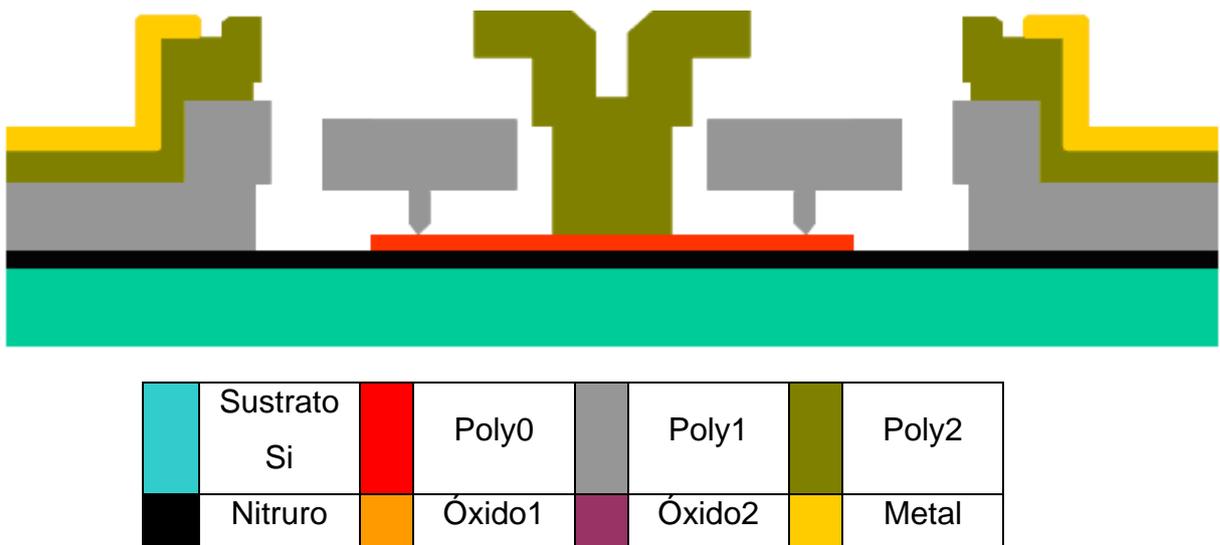
Una vez que se han grabado los espacios para unir o anclar las capas estructurales, se depositan 1.5  $\mu\text{m}$  de polisilicio como segunda capa estructural

(Poly2), se modela la película (nivel de máscara POLY2) y se graba para lograr la estructura deseada. El último depósito del proceso es una capa de 0.5  $\mu\text{m}$  de oro (metal), que sirve para: unir otros dispositivos, conectarlo eléctricamente o como superficie altamente reflectante. La oblea es modelada litográficamente (nivel de máscara METAL) y posteriormente, se deposita y modela el oro.

Finalmente, se liberan las dos capas de sacrificio de PSG y la estructura queda totalmente formada [8].



**Figura 1.2.** Estructura PolyMUMPS's antes de la liberación de las capas de sacrificio.



**Figura 1.3.** Estructura PolyMUMPS's liberada y con depósito de oro.

### **1.3 Aplicaciones de los MEMS**

Hoy en día, los dispositivos MEMS han ganado terreno en muchas aplicaciones en distintos campos. Entre estas aplicaciones se pueden mencionar la industria aeroespacial, de las comunicaciones, biomédica, robótica, entretenimiento y la automotriz.

Sin embargo, las aplicaciones de la tecnología MEMS con más experiencia son:

- Tecnología Automotriz (micro sensores de rotación para sistemas GPS y micro acelerómetros para disparar las bolsas de aire).
- Electrónica de entretenimiento (Procesadores Digitales de Luz DLP para proyectores y pantallas de alta definición).
- Telecomunicaciones (interruptores de alta frecuencia e interruptores ópticos).

Los dispositivos MEMS más empleados en los distintos campos de aplicación son los sensores inerciales, tales como el acelerómetro y el giroscopio. Por lo que, en la siguiente sección se describen con más detalle las distintas aplicaciones de los sensores inerciales tipo MEMS.

#### **1.3.1 Aplicación de los sensores inerciales MEMS**

El acelerómetro es un sensor inercial capaz de detectar vibraciones, golpes e inclinaciones en varias direcciones, dependiendo del número de ejes. Su rango se mide en g's (gravidades). Los acelerómetros de bajas g's se aplican para medir vibraciones e inclinaciones, como en el sistema de frenos ABS (*Antilock Breaking System*) y en la suspensión electrónica controlada (*Electronically Controlled Suspension*). Los acelerómetros de g's grandes, se usan para la detección de colisiones (usado en los sistemas de bolsas de aire).

El micro acelerómetro es el elemento central en el sistema de disparo de las bolsas de aire, ya que proporcionan una señal eléctrica proporcional a la aceleración que experimenta el vehículo. Así que, cuando se presente una colisión, existirá una desaceleración brusca, que será detectada por el acelerómetro y enviará la señal de control que activa las bolsas de aire.

Entre los nuevos proyectos que se están desarrollando para la industria automotriz, está el monitoreo de la presión de los neumáticos, llamado TPMS (*Tire Pressure Monitoring Systems*). Este sistema requiere de un sensor de presión y un acelerómetro. Con dicho sistema se podrían evitar los accidentes debidos a la presión baja en los neumáticos. En Estados Unidos a partir de Septiembre del 2007, es obligatorio que todos los vehículos nuevos vengan equipados con dicho sistema [9].

Los acelerómetros, también se pueden instalar en cada uno de los ejes (X, Y, Z) en los vehículos, o bien, en cualquier dispositivo móvil, portafolios, maletas, etc. para detectar cualquier movimiento no permitido cuando se accione el sistema de seguridad y evitar el robo del artículo en cuestión.

Otra aplicación es el programa de estabilidad electrónico (*Electronic Stability Program*), el cual consiste en detectar la diferencia entre los controles de conducto contra la respuesta del vehículo. En caso de haber una diferencia; se le aplica el freno adecuado a cada una de las ruedas para mantener la trayectoria correcta. Esto es una combinación de varios subsistemas que se han desarrollando en los vehículos (ABS = *Anti-lock Brake System*, EBD= *Electronic Brake force Distribution*, TCS = *Traction Control System*, AYC= *Active Yaw Control*).

En el campo de los dispositivos móviles, la combinación de acelerómetros MEMS y el software adecuado, por ejemplo, Scalable Vector Graphics, eliminan la necesidad de utilizar interruptores y botones, para deslizarse y navegar en páginas webs y libros electrónicos, resolviendo de forma muy efectiva el problema de “botón pequeño-dedo grande” de muchos usuarios. Esto lo hace utilizando un giroscopio que actúa como sensor de inclinación/movimiento, el cual puede detectar los movimientos humanos usándolos para orientar la posición de salida de las imágenes en la pantalla; de esta forma el usuario podrá manipular la orientación de las mismas con solo girar o inclinar el dispositivo móvil.

Otra aplicación es la brújula, empleada en los dispositivos móviles, que cada vez es más precisa y amigable en su lectura, pues a través de un módulo inercial que contiene un magnetómetro y un acelerómetro, hace posible que el usuario pueda leer la brújula sin importar la posición o inclinación del dispositivo.

Por otro lado, las empresas de telefonía móvil que tengan como objetivo el mercado de los adolescentes necesitan implementar interfaces más amigables para los video juegos, esto es, que a través de acelerómetros y giroscopios sean detectados los movimientos de la mano y trasladados a acciones en el video juego.

Los teléfonos celulares más recientes ya vienen equipados para capturar fotografías y videos, en los cuales los giroscopios MEMS realizan el trabajo de estabilizar las imágenes de forma muy efectiva, aumentando la calidad de las mismas, sobre todo, por el espacio y capacidad de energía reducidos con el que cuentan los teléfonos celulares.

En general, los sensores inerciales MEMS son esenciales en los videojuegos y en el emergente mercado de los juguetes robóticos. Los más novedosos controles de videojuegos, además de ser inalámbricos, detectan todos los movimientos de la mano, los que se trasladan al video juego de realidad virtual. En los juguetes robóticos son necesarios para realizar movimientos precisos de acuerdo a la orientación y ubicación brindada por los giroscopios y acelerómetros.

Así mismo, todos los dispositivos móviles actuales: computadoras portátiles, computadoras de bolsillo, PDA's, reproductores de MP3, centros de entretenimiento portátiles, utilizan discos duros (HDD) para el almacenamiento de información. Esto implica un problema, ya que con frecuencia se caen y al caerse la cabeza del disco duro puede deslizarse y borrar la información, imágenes, música, películas etc., así que, con un acelerómetro MEMS es posible ofrecer una solución adecuada, es decir, una característica de protección. Cuando el dispositivo móvil está cayendo, el acelerómetro detecta la gravedad cero y da la señal para retirar la cabeza del disco duro.

En el campo de la electrónica para telecomunicaciones, la tecnología MEMS ha sido especialmente importante para el desarrollo de nuevos diseños de elementos específicos que permiten el mejor desempeño de circuitos necesarios para la transmisión. Algunos de dichos elementos son: inductores, capacitores, resonadores, y más recientemente, cantilevers estos son utilizados en la construcción de avanzados interruptores accionados electrostáticamente, los cuales, reconfiguran radios y antenas, y así se podrán controlar apropiadamente las antenas con longitudes variables para teléfonos

celulares, permitiendo transmisión y recepción máximas conforme el teléfono celular se mueve de un área de cobertura hacia otra, independientemente de los límites geográficos y diferencias en los estándares de uso de frecuencia. También se ha aplicado en la combinación de interruptores de radiofrecuencia con otros circuitos para crear filtros reconfigurables utilizados en transceptores de modo múltiple en dispositivos móviles.

Los sistemas de navegación satelital como GPS (Global Positioning System, por sus siglas en inglés), a través de señales de radio frecuencia enviadas por un satélite, pueden ubicar el receptor en cualquier parte del globo terráqueo; sin embargo, en la práctica, la señal emitida por el satélite se pierde fácilmente debido a edificios altos, puentes, antenas, sobre todo en ciudades muy urbanizadas. Bajo este contexto, los sensores inerciales MEMS asisten al sistema GPS. En caso de perder la señal, por medio de acelerómetros y giroscopios se puede implementar un sistema que calcule la distancia y la dirección recorrida durante el tiempo que no se detectó la señal del satélite. Es importante resaltar que la tecnología MEMS es ideal para cada una de las aplicaciones antes mencionadas pues utilizan realmente muy poca energía y espacio, bajo costo de producción, además de tener una mejor velocidad de respuesta.

#### **1.4 Estado de Arte de los MEMS**

La nueva estimación del mercado de MEMS para los años 2007 a 2012 espera que dicho mercado alcance un valor de \$14 mil millones de dólares (sólo en el ámbito del chip) para el año 2012. Esto representará el doble que en el año del 2007 de \$7,1 mil millones de dólares. Para el 2008, se espera que el mercado sea de \$7,2 mil millones de dólares, lo cual representa una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta de 14% para el periodo de 2007-2012. El crecimiento de 2007-2010 será más modesto (11%), esperando un incremento fuerte para después del 2010 (Figura 1.4) [10].

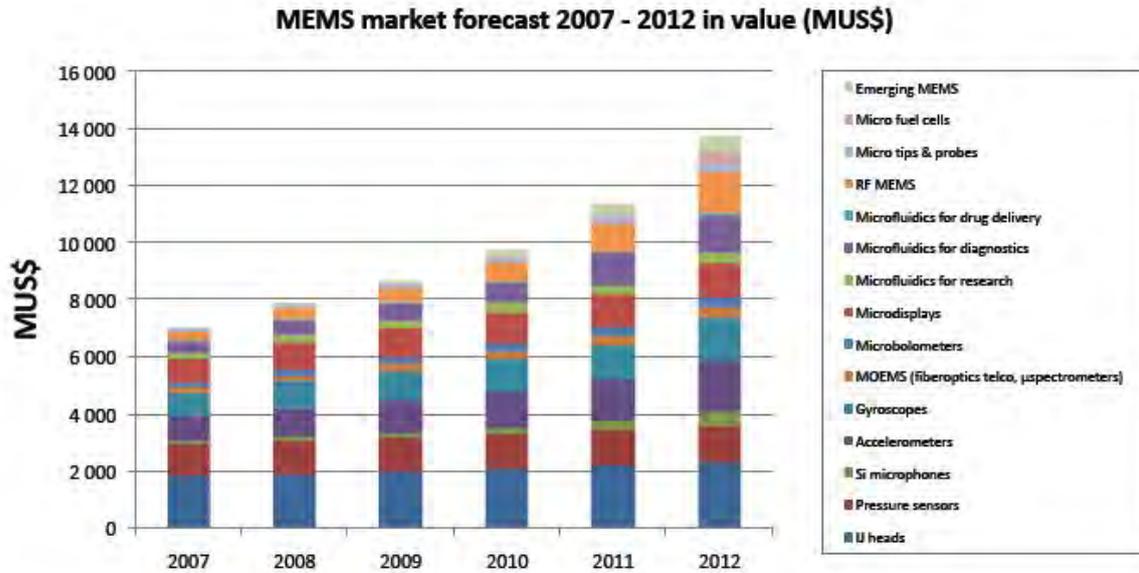


Figura 1.4. Mercado de MEMS 2007-2012.

En el año de 2007 llegaron al mercado una gran variedad de nuevos dispositivos MEMS: enfocadores automáticos, osciladores y giroscopios de doble eje, solo por citar algunos. Por lo que en la actualidad se han realizado estimaciones con base en unidades MEMS producidas en el periodo de 2007-2012. Se estima que para el año 2012, se entreguen 6,2 millones de dispositivos MEMS en todo el mundo (Figura 1.5) [10].

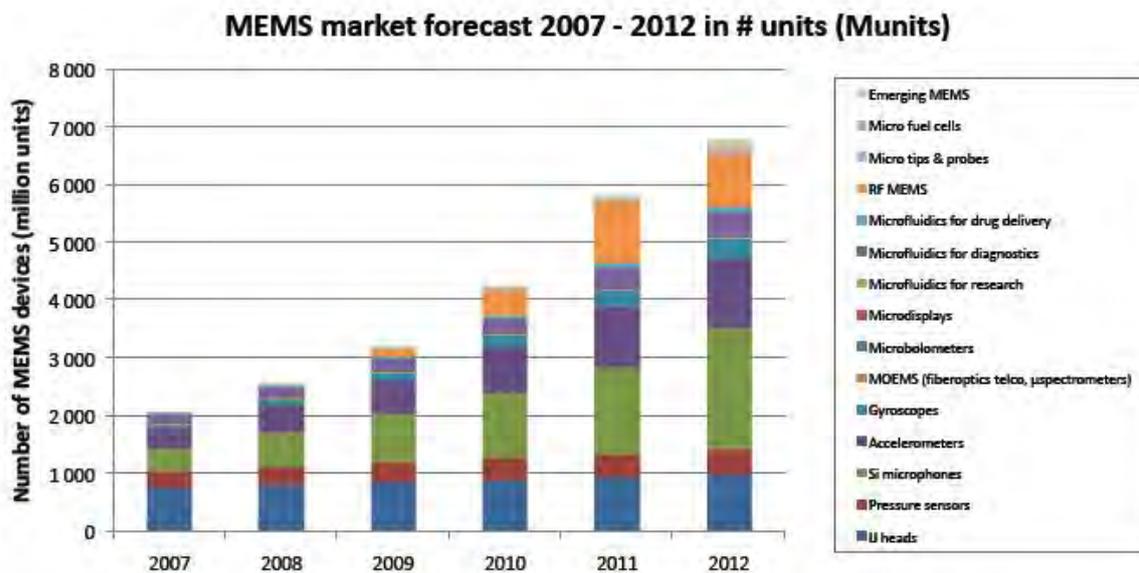


Figura 1.5. Mercado de MEMS por unidad de dispositivos.

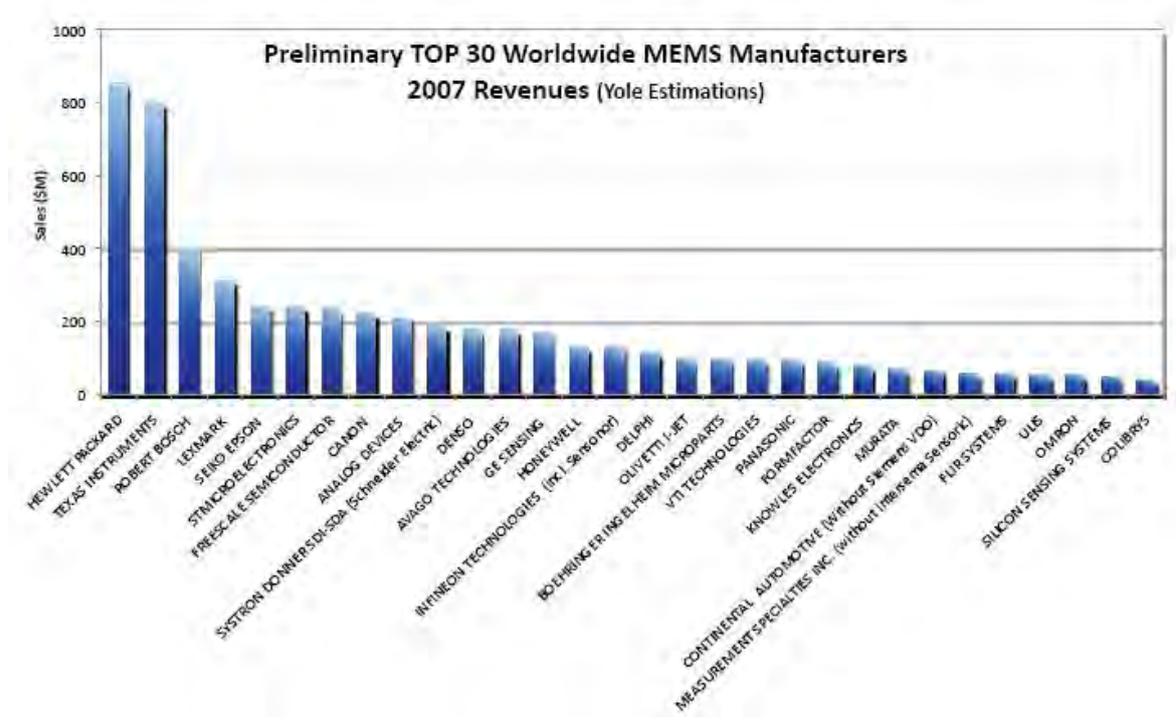
Es interesante notar que a pesar del aumento mayor de 2007-2008 en unidades de MEMS (25%), el crecimiento del valor del mercado fue de sólo el 9%. Esto se explica, debido a la fuerte presión de precios sufrida actualmente por los dispositivos de MEMS. Después de 2009 los MEMS de RF y los micrófonos de silicio contribuirán para un aumento en el número de dispositivos MEMS (arriba de 45%). Las aplicaciones de MEMS se pueden dividir en siete campos principales: Automotriz, Aeronáutico, Bienes de Consumo, Defensa, Industrial, Médico y Biológico, y Telecomunicaciones.

Aunque las aplicaciones automotrices hayan sido históricamente el motor del mercado de MEMS crecerán solamente una modesta tasa de 3.5% durante el período de 2007-2012. Por otro lado, las aplicaciones médicas y biológicas, bienes de consumo y telecomunicaciones (inalámbrica) contribuirán significativamente para el mercado de MEMS después de 2010. Sus tasas de crecimiento serán respectivamente 18%, 11% y 40%. En 2012, las aplicaciones de bienes de consumo (esto incluye cabezas de chorro de tinta, MEMS inerciales, micro-pantallas y el desarrollo de dispositivos de MEMS tales como los sistemas de captación de energía, enfoque automático, micro zoom, micro motores será de más de 40% del mercado total. El fuerte crecimiento (21%) para la defensa, se debe principalmente, al uso de los valiosos MEMS inerciales para orientación de municiones. El mercado de MEMS para nuevas aplicaciones y células de combustible tendrá un impacto después del 2009 y durante el período de 2009-2012, su Tasa de Crecimiento Anual Compuesta será de 67% y 158%, respectivamente.

Con base en la Tasa de Crecimiento Anual Compuesta se puede ver que la expectativa es que los MEMS de RF tengan el mayor crecimiento (50%), seguidos por los chips microfluídicos para administración de medicamentos (42%), micrófonos de silicio (32%), chips microfluídicos para diagnósticos (23%), micro puntas y sondas (22%) y microbolómetros (20%).

Los acelerómetros para Interfaces Hombre-máquina en la parte superior de la lista tienen una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta excediendo los 120% y una expectativa de valor de mercado de \$500 millones en el 2012. Después, tenemos los MEMS de RF para ATE (Automated Test Equipment - Equipo de Prueba Automatizado) (81%), microbolómetros [11] para la industria automotriz

(54%), inhaladores (41%), microfluídicos para investigación y desarrollo de chips celulares (37%) y análisis proteómica (26%) (Figura 1.6) [10].



**Figura 1.6.** Clasificación preliminar de los 30 mayores fabricantes de MEMS.

Es un hecho que no se augura un cambio fuerte para el año 2008, sin embargo, el gran cambio sucederá en el periodo de 2009 a 2010, después de una onda de fusiones de las empresas dedicadas al diseño y fabricación de MEMS.

Las empresas dedicadas hasta el momento al diseño de MEMS saben que, durante el desarrollo y estudio de los dispositivos MEMS existe una constante necesidad de comparar eficientemente los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas con el comportamiento real del dispositivo MEMS, para así poder adaptar los procesos de producción modificando las características geométricas hasta llegar al desempeño requerido para una aplicación determinada.

En conclusión, sabemos que el pleno desarrollo de la tecnología MEMS comprende procesos de optimización y control de calidad, que implican la caracterización dinámica y estática de su forma y desempeño mecánico, respectivamente. Esto requiere de tecnologías no invasivas para la manipulación, excitación y medición del desempeño mecánico de los MEMS.

Las técnicas empleadas para la caracterización de MEMS fundan sus bases en principios ópticos que se revisan en el capítulo 2 de este trabajo.

### 1.5 Bibliografía y Referencias

1. **Maluf, Nadim.** *An Introduction to Microelectromechanical systems engineering.* Norwood, MA, USA : Artech House MEMS library, 2000. 0-89006-581-0.
2. [En línea] <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman..>
3. **Gribbin, John.** *Richard Feynman: A Life in Science.* s.l. : Dutton, 1997.
4. **Pelesko, A. John y Berstein, H. David.** *Modeling MEMS and NEMS.* Boca Raton, Florida, USA. : Chapman and Hall/CRC, 2002. ISBN 1-58488-306-5.
5. **Chen, Wai-Kai.** *The VLSI handbook.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, LLC., 2000. ISBN 0-8493-8593-8.
6. **Lyshevski, Sergey Edward.** *Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-916-6.
7. **Madou, M.J.** *Fundamentals of Microfabrication.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 1997. .
8. **Carter Jim , Cowen Allen, Hardy Busbee , Ramaswamy Mahadevan, Stonefield Mark, and Wilcenski Steve.** *PolyMUMPs Design Handbook.* s.l. : MEMSCap Inc., 2005.
9. *Emergin Market for Microfluidics Applications 2003-2010 market Analysis.* **NEXUS.** Noviembre, 2004.
10. **YOLE Développement.** <http://www.yole.fr>. <http://www.yole.fr>. [En línea] Mayo de 2008.

11. **Leti.** [www-leti.cea.fr](http://www-leti.cea.fr). *www-leti.cea.fr*. [En línea] 2007. [Citado el: 5 de Noviembre de 2008.]

12. **Leyva, F. Hugo Ramírez.** [En línea]  
<http://www.utm.mx/~rruiz/seminarios/docs/11/s09Nov.pdf>.

## **CAPÍTULO 2**

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

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

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

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

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

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

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

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

## **2.1 Interferometría**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

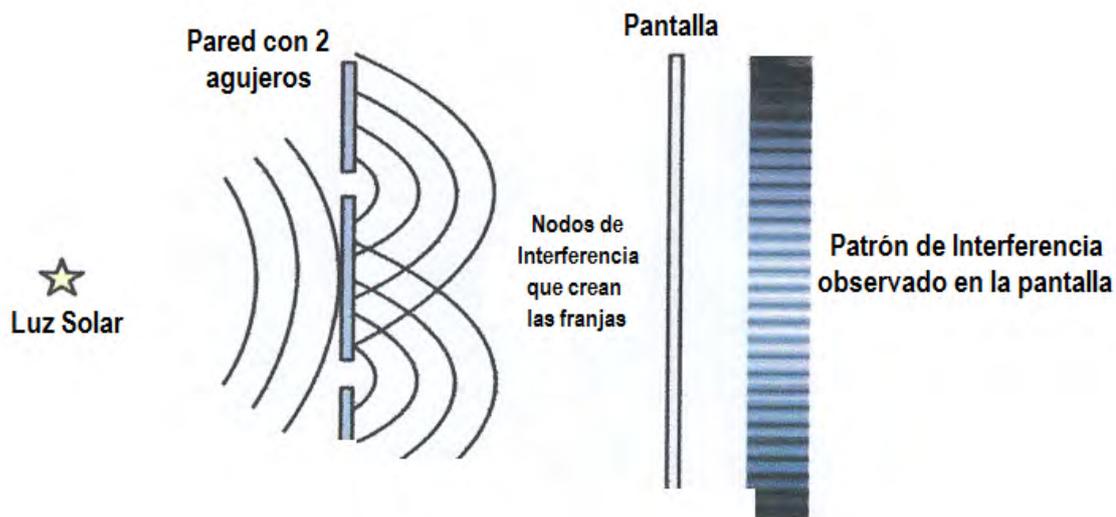
Existen muchos aparatos de interferometría que producen la interferencia de dos ondas de luz, sin embargo, todos estos aparatos siguen dos reglas fundamentales:

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

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

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

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



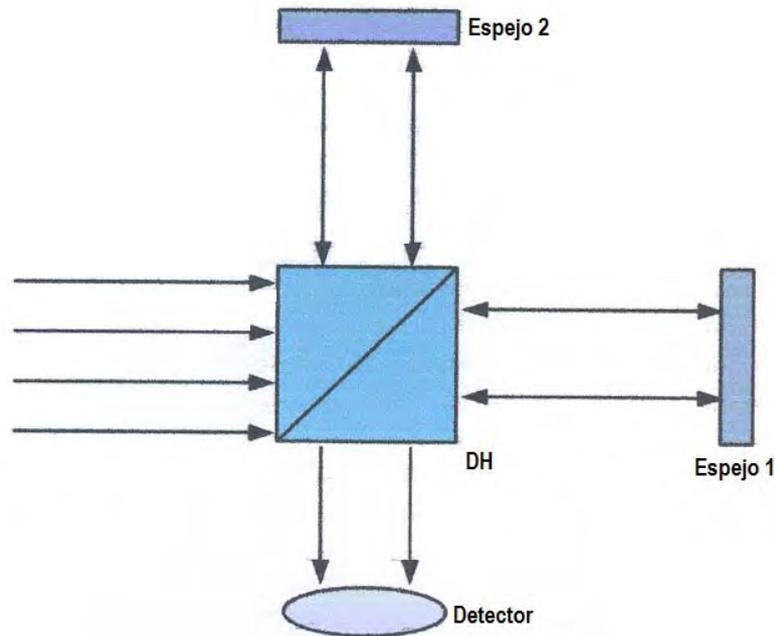
**Figura 2.1.** Experimento de la doble rendija de Young: Interferómetro de frente de onda dividida.

### 2.1.3 Interferómetros de amplitud de onda dividida

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

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

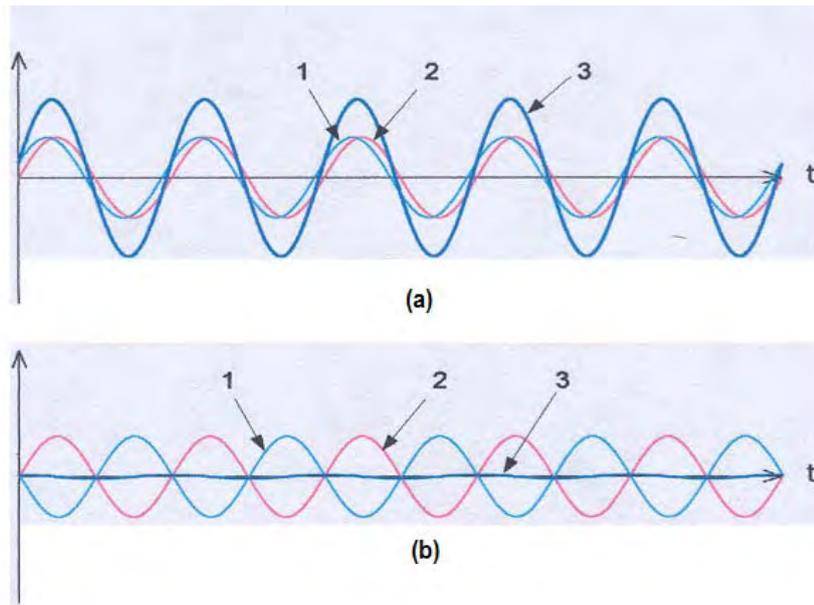
La diferencia entre el interferómetro con divisor de frente de onda y esta configuración es que en esta configuración no se hace interferencia de dos partes separadas de un frente de onda, sino que, la interferencia ocurre de dos ondas parciales originadas de una sola onda original.



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

#### 2.1.4 Interferencia

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



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

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

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

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

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

### 2.1.5 Coherencia

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

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

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

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

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

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

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

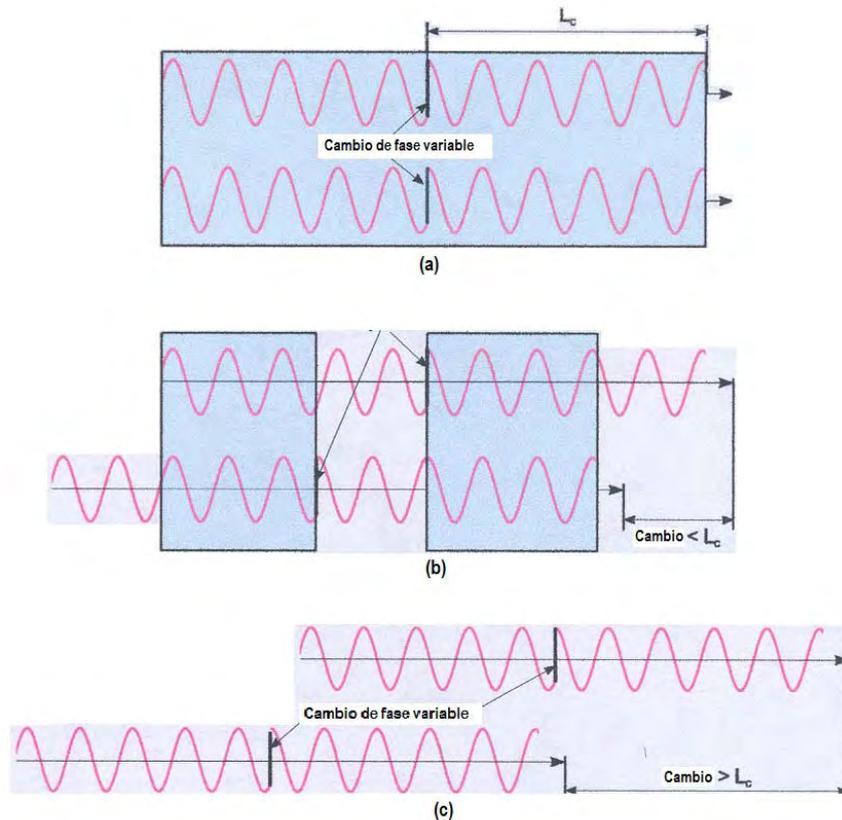
Así que, para poder representar las fuentes de luz reales, se supone que la salida está formada por trenes de onda con longitud finita y con cambios de fase aleatorios entre cada tren de ondas [9].

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.3)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

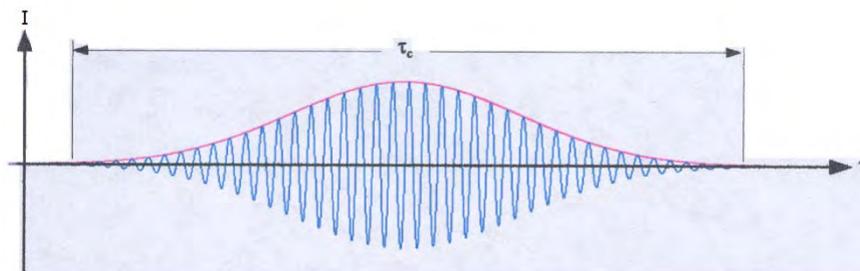
La longitud de coherencia  $L_c$  también puede ser definida como la distancia que la onda viaja en el tiempo  $\tau_c$ .

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

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

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

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



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

## 2.2 Configuraciones de los Interferómetros

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

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

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

### 2.2.1 Interferómetro de Michelson

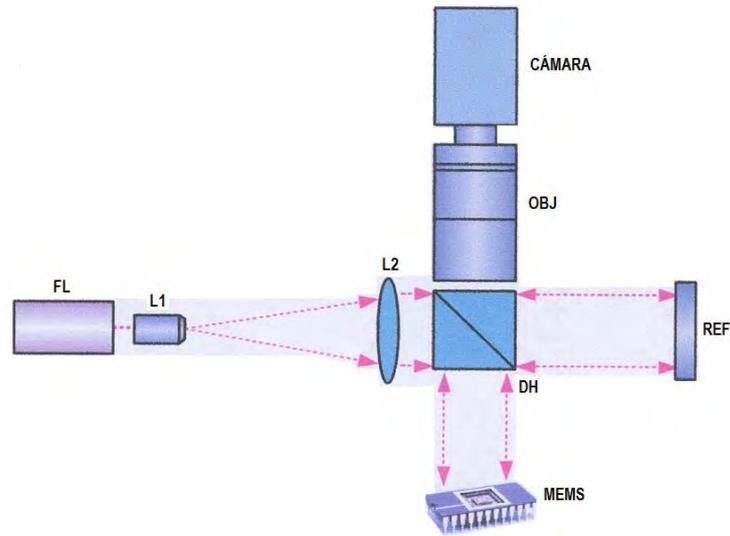
El interferómetro de Michelson es uno de los interferómetros más versátiles desarrollados hasta ahora y uno de los diseños más antiguos, pero no por ello se ha dejado de emplear; por el contrario, se han realizado muchas variaciones que en la actualidad son de las más empleadas para diferentes propósitos.

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

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

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

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



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

### 2.2.2 Interferómetro de Mirau

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

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

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

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

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

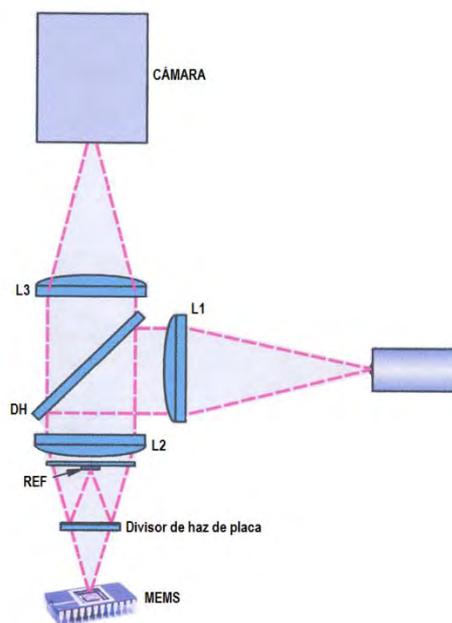


Figura 2. 7. Esquema de un interferómetro de Mirau.

### 2.2.3 Interferómetro de luz blanca de escaneo vertical

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

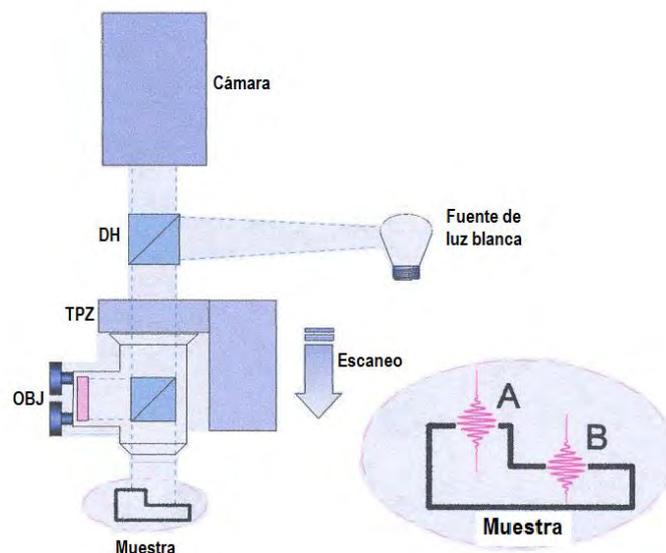
de banda ancha y un método de seguimiento de coherencia, para medir la forma de los objetos con alturas que los interferómetros de incremento de fase convencionales no pueden medir [11].

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

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

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

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



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

### 2.3 El Estroboscopio

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

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

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

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

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

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

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

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

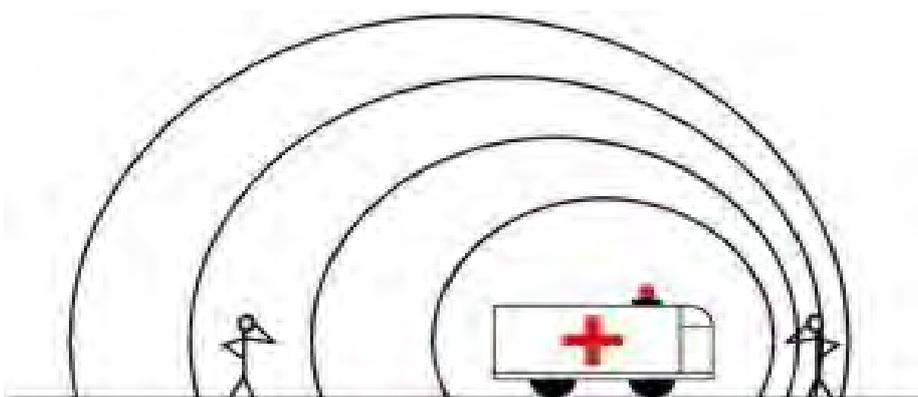
Este fenómeno fue analizado por Christian Doppler (1803-1853) para explicar la variación de la frecuencia de las ondas luminosas que provienen de los cuerpos celestes. Doppler propuso este efecto en 1842 en una monografía titulada *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des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

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

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

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

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



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

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

### 2.4.1 El vibrómetro de láser Doppler

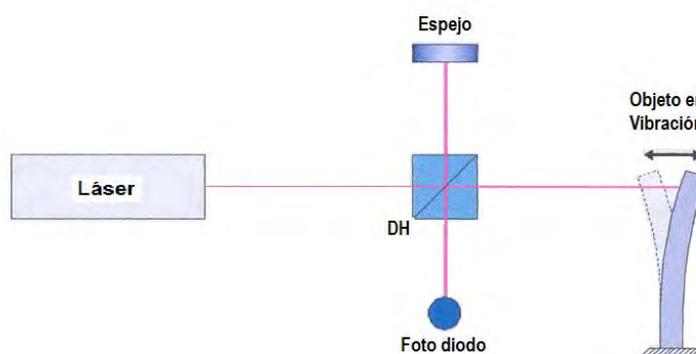
El vibrómetro es un interferómetro basado en la configuración de Michelson solo que emplea la técnica conocida como Vibrómetro de Láser Doppler.

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

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

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

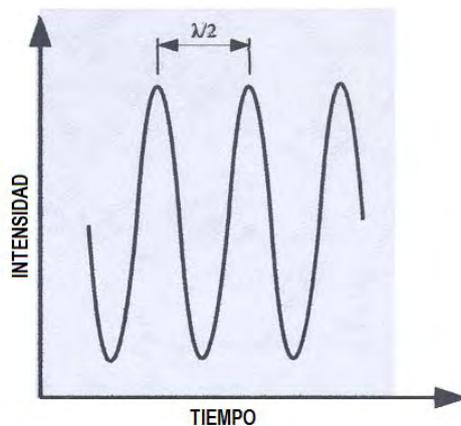
En la figura 2.10 se muestra la configuración fundamental de un vibrómetro, que resulta muy similar al interferómetro de Michelson. El haz del láser es dividido en dos partes o brazos, que actúan como un haz de referencia y un haz objeto. El haz objeto apunta al objeto vibrante, y la luz reflejada es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



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

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

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



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

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

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

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

## 2.5 Bibliografía y Referencias

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

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

13. **Wikipedia free encyclopedia.**

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

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

## **CAPÍTULO 3**

### **EL ANALIZADOR DINÁMICO DE MICROSISTEMAS ELECTROMECAÑICOS MSA-400**

En la actualidad, los dispositivos MEMS reflejan la tendencia tecnológica hacia la miniaturización y la integración multifuncional de los sistemas, lo que nos lleva a la implementación de nuevos productos que cubran los requerimientos del nuevo mercado como reducción de materiales, bajo consumo de energía y, por su puesto una tecnología más avanzada que en un futuro no muy lejano alcanzará mayor desempeño.

Los productos MEMS han ganado aceptación en muchas industrias entre las que se pueden mencionar la automotriz, de las comunicaciones, instrumentación, control y aeroespacial. Sin embargo, la realidad muestra que para entrar de lleno al mercado, es necesario completar los estándares y tolerancias de funcionamiento, y así hacer de los nuevos dispositivos MEMS sistemas más eficaces. Por lo anterior, se requiere realizar la caracterización de los microsistemas pero no sólo en sentido estático sino dinámico es decir, cuando están en funcionamiento.

La caracterización de dispositivos MEMS juega un papel muy importante en el desarrollo y evolución de estos productos. Pues se verifica el diseño inicial del dispositivo lo que involucra pruebas de funcionamiento, comparación de resultados reales con las especificaciones requeridas, y finalmente se determinan variaciones durante el proceso de rediseño, en otras palabras se determina el éxito o el fracaso del diseño original.

La plena caracterización de los dispositivos MEMS presenta retos difíciles, debido a que en un entorno en el que las dimensiones se miden en micras y las frecuencias de resonancia mecánica se miden en kilo Hertz, las técnicas y mediciones convencionales de caracterización de sistemas no pueden ser empleadas.

Estudios anteriores han demostrado que la interferometría con sus diferentes configuraciones, es un método efectivo para realizar la caracterización dinámica de las superficies de los dispositivos MEMS en tercera dimensión para frecuencias de hasta 1 MHz.

La tecnología que se revisa en este trabajo resuelve muchos de los problemas que se presentan durante la caracterización de dispositivos MEMS, pues no se hace uso de técnicas mecánicas, sino ópticas.

### **3.1 El analizador de Microsistemas MSA-400 del Centro UNAMems**

El Analizador de Microsistemas MSA-400 es la principal tecnología de medición para el análisis y visualización de las vibraciones estructurales y la topografía de superficie en micro estructuras como los dispositivos MEMS. Esto, gracias a la completa integración de un microscopio, un vibrómetro de escaneo con láser Doppler, un microscopio con video estroboscópico; y un interferómetro de luz blanca [1].

El MSA-400 está diseñado con la combinación de varias tecnologías que clarifican la respuesta dinámica micro estructural real así como, la topografía. En la actualidad, incorporado en el diseño y ciclo de pruebas de dispositivos MEMS el MSA-400 ofrece información precisa en tercera dimensión de la respuesta estática y dinámica de los dispositivos MEMS que simplifica la solución de problemas, mejorando y acortando los ciclos de diseño y por consiguiente, reduciendo los costos de producción de dispositivos MEMS.



**Figura 3.1.** MSA-400 del Centro UNAMems.

#### **3.1.1 Descripción general del analizador MSA-400**

El Analizador de Microsistemas MSA-400 hace uso de la luz para realizar mediciones en tercera dimensión tanto estáticas como dinámicas sin necesidad

de hacer contacto con los dispositivos MEMS. Para ello, se emplean tres tecnologías fundamentales: un vibrómetro con Láser Doppler para medir la respuesta dinámica fuera del plano; un microscopio con video estroboscópico para medir la respuesta dinámica en el plano; y un interferómetro de luz blanca para obtener la topografía en tercera dimensión y de alta resolución de los dispositivos MEMS [1]. Estas tres tecnologías ópticas se encuentran totalmente integradas de forma compacta en un robusto y fiable cabezal de medición.

Con la combinación de dos técnicas de medición complementarias para el estudio del comportamiento de vibraciones de las micro estructuras, es posible obtener una respuesta más precisa de los dispositivos MEMS. Por ejemplo, se pueden identificar, visualizar y medir rápidamente las frecuencias de resonancia y las respuestas transitorias de los dispositivos MEMS. Usando la excitación del micro sistema de banda ancha con la técnica de láser Doppler, es posible encontrar rápidamente las frecuencias de resonancia mecánica sobre el plano y fuera del plano sin necesidad de conocer dicha información con anterioridad. Empleando la técnica del microscopio con video estroboscópico se puede obtener información precisa en amplitud y fase de las resonancias sobre el plano identificadas por el láser del vibrómetro.

Los beneficios que ofrece el Analizador de Microsistemas MSA-400 son:

- Identificación y visualización rápida tanto de las frecuencias de resonancia así como de la topografía de los MEMS.
- Integración total de un microscopio óptico con tecnologías que ofrecen la medición dinámica y estática de los dispositivos MEMS.
- Fácil integración con plataformas de estaciones de pruebas para dispositivos MEMS.
- Acorta el ciclo de medición de dispositivos MEMS.

## **3.2 Caracterización de MEMS**

### **3.2.1 Topografía de los MEMS**

Las propiedades de las superficies tales como la rugosidad, son parámetros importantes que nos ayudan a verificar la calidad en el proceso de producción de los dispositivos MEMS.

Conociendo la topografía real de los MEMS es posible comparar las dimensiones reales de las estructuras que conforman al dispositivo con las requeridas en el diseño, lo que requiere de técnicas no táctiles y con resoluciones de micrómetros y, algunas veces nanómetros.

El análisis estático de las estructuras de los MEMS se realiza principalmente para determinar los desplazamientos, las tensiones y deformaciones de éstas causadas al aplicar cargas externas. Con dichos análisis, se determinan los límites de funcionamiento del sistema en general, y con ello se pueden realizar cambios precisos en la geometría de las micro estructuras para lograr el desempeño requerido. Además, con dichas mediciones y con un análisis más avanzado y riguroso se pueden realizar estudios del envejecimiento y resistencia de las estructuras [2].

La topografía de los MEMS resulta de suma importancia para la realización de estudios más avanzados de las estructuras, que van desde la simple medición de dimensiones hasta la plena caracterización de las deformaciones estructurales, resistencia térmica y mecánica de materiales, defectos en la superficie y deficiencias en los diseños geométricos de los dispositivos MEMS.

### **3.2.2 El Sistema de Medición Topográfica (TMS)**

El desempeño dinámico de los dispositivos MEMS está directamente ligado con los parámetros del proceso de producción que determinan la geometría de las micro estructuras. El Sistema de Medición Topográfica integrado en el Analizador de Microsistemas MSA-400, es el encargado de realizar las mediciones topográficas en segunda y tercera dimensión de los MEMS.

Un conjunto de datos con alta resolución espacial y valores precisos de Z de todos los puntos, alimenta una poderosa herramienta de análisis que determina la forma, la curvatura, la planicidad o planitud, y la rugosidad de las micro estructuras. Esto se realiza pasando un objetivo de referencia con resolución nano métrica con respecto a la muestra, generando una cartografía de alta precisión en los ejes tridimensionales X, Y, Z. El usuario puede seleccionar el tipo de procesamiento de datos, entre evaluación de la envolvente, o evaluación de fase [3]; así como, filtros digitales y técnicas de ocultación de datos. Los beneficios obtenidos por el Sistema de Medición Topografía son:

- Una rápida medición topográfica en tercera dimensión de alta resolución sin necesidad de hacer contacto con la superficie.
- Determinación de la altura y forma de las micro estructuras con diferentes tipos superficies.
- Técnica de superposición de capas con diferentes niveles de contraste y materiales.
- Presentación de las estructuras en dos y tres dimensiones.

A continuación, se revisa con más detalle las técnicas empleadas por el Sistema de Medición Topográfica.

### **3.2.2.1 Teoría de la Interferometría de luz blanca**

Las estructuras tridimensionales con superficies lisas ópticamente rugosas con o sin escalones pueden ser medidas con interferómetros de luz blanca de escaneo vertical.

La Interferometría de luz blanca es un método óptico no táctil utilizado para la realización de mediciones de perfiles en tercera dimensión de estructuras con dimensiones de entre unos cuantos centímetros hasta micrómetros. La incertidumbre de la topografía medida con este método no depende de los parámetros del montaje óptico como es el caso de otros métodos de medición como el método de detección por enfoque, y la interferometría de triangulación y corte.

El escáner actúa con la ayuda de una etapa de posicionamiento de alta precisión (coordenada Z o piezo), que modifica ya sea la longitud de la referencia o la longitud del brazo de medición. Una fuente de luz con longitud coherente de micrómetros es usada para obtener la señal de interferencia únicamente para los pixeles en los que la longitud de la referencia y la longitud del brazo de medición son aproximadamente iguales.

La medición se obtiene de cada uno de los pixeles de la cámara independientemente de los pixeles alrededor de estos, y por lo tanto, al correspondiente lugar sobre la superficie del objeto en medición. La altura del objeto es medida con la adquisición de los valores de "Z" de la etapa de posicionamiento, es decir, que se escoge el pixel en el que ocurre la máxima

modulación de la señal de interferencia. Dichas señales son procesadas en una computadora personal.

La técnica puede ser usada para medir estructuras con escalones tan altos como el rango vertical de trayecto de la etapa de posicionamiento. Incluso, superficies rugosas en las que se producen motas pueden ser medidas con este método. Para la interferencia de luz blanca es necesario que la longitud de coherencia de la fuente de luz sea lo suficientemente pequeña para brindar un correlograma claro de envolvente máxima. Usualmente, el correlograma tiene entre 5 y 100 periodos con modulación visible de la señal de interferencia [3].

### **3.2.2.2 Interferómetro de luz blanca de Michelson**

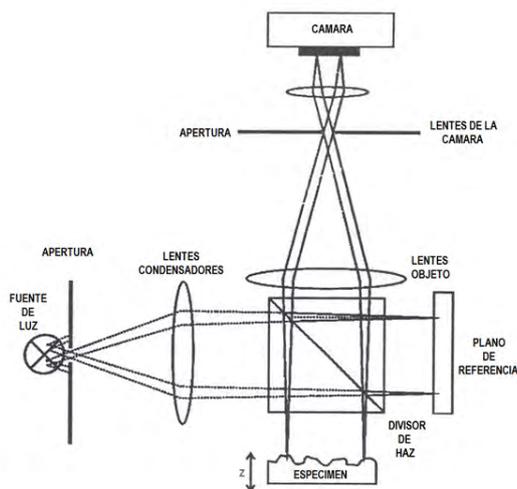
El Interferómetro de luz blanca es similar al Interferómetro de Twyman-Green, es una forma especial del interferómetro de Michelson con óptica de imagen que proyecta el objeto y el plano de referencia en una pantalla de 2 dimensiones. Dicha pantalla es una cámara acoplada por carga (CCD Camera Chip) también se utiliza una fuente de luz de banda ancha para el Interferómetro de luz blanca. El objeto bajo investigación se encuentra en uno de los brazos del interferómetro.

Un objeto con superficie rugosa posee un patrón de intensidad aleatoria que interfiere con la luz del plano de referencia en el detector de plano. Cada una de las diminutas protuberancias o imperfecciones tiene una fase aleatoria. Y dicha fase permanece aproximadamente constante en su correspondiente protuberancia o imperfección. Por lo tanto, una interferencia aparece en la cámara como un pixel, si las longitudes del camino óptico de los dos brazos difieren menos de la mitad de la longitud de onda coherente de la fuente de luz. Cada pixel del sensor de la cámara es una muestra del típico correlograma de luz blanca (señal de interferencia) cuando la longitud de la referencia o la longitud del brazo de medición se modifican en la etapa de posicionamiento. La señal de interferencia de un pixel tiene una modulación máxima cuando la longitud del camino óptico que incide sobre el pixel es exactamente el mismo tanto para la referencia como para el haz objeto.

Por lo tanto, el valor de  $Z$  para el punto de la superficie de la imagen en dicho pixel corresponde al valor de  $Z$  de la etapa de posicionamiento en el que la modulación del correlograma fue la máxima. Posteriormente, se obtiene una

matriz con los diferentes valores del alto de la superficie del objeto a medir, determinando los valores Z de la etapa de posicionamiento en los que la modulación fue máxima para cada uno de los pixeles de la cámara. Las posiciones sobre el plano de los diferentes valores del alto de dicha superficie, dependen del correspondiente punto en el objetivo que es la imagen en la cámara formada por la matriz de dichos pixeles. Dichas coordenadas laterales, en conjunto con las correspondientes coordenadas verticales, describen la forma geométrica del objeto medido. La incertidumbre de la imagen lateral, depende principalmente de la rugosidad de la superficie medida. Para superficies lisas la exactitud de la medición está limitada por la exactitud de la etapa de posicionamiento.

La configuración óptica de un interferómetro Twyman-Green se muestra en la figura 3.2.



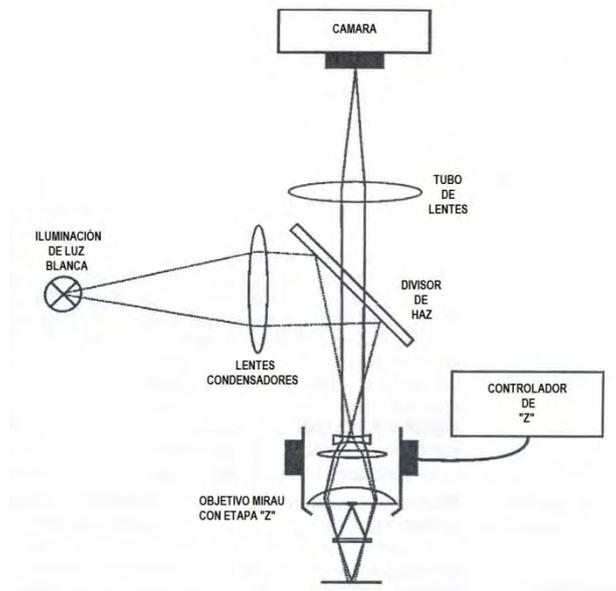
**Figura 3.2.** Configuración óptica del Interferómetro Twyman-Green con sensor de cámara.

El funcionamiento de un sistema de este tipo es el siguiente: los lentes de un condensador coliman la luz de la fuente de luz de banda ancha. Un divisor de luz divide el haz de luz en haz de referencia y haz de medición. Un haz se refleja en el espejo de referencia, mientras que el otro haz se refleja o dispersa por la superficie del objeto a medir. Los haces de luz que regresan son retransmitidos por el divisor de haz al sensor acoplado por carga (CCD sensor), formando así, una señal de referencia, dependiente de la posición del objeto para cada uno de los pixeles. El ancho del correlograma es la longitud de

coherencia y, por lo tanto, depende de la anchura espectral de la fuente de luz [3].

### 3.2.2.3 Microscopios con interferómetros de luz blanca

Es necesario combinar el interferómetro con la configuración óptica de un microscopio para poder visualizar estructuras microscópicas. Como el arreglo que se muestra a continuación.



**Figura 3.3.** Diseño esquemático de un microscopio de interferencia con objetivo Mirau.

La configuración es similar al del microscopio óptico común. Las únicas diferencias son los objetivos de interferometría óptica, y una etapa de posicionamiento de alta precisión (un actuador piezoeléctrico), que se utiliza para mover el objetivo interferométrico verticalmente.

La magnificación óptica de la imagen en el chip acoplado por carga (CCD chip), no depende de la distancia entre el tubo de la lente y la lente objetivo, siempre que el microscopio proyecte el objeto bajo investigación al infinito. El objetivo interferométrico es la parte más importante de un microscopio interferométrico. Existen dos tipos de objetivos diferentes: el objetivo de Michelson y el objetivo de Mirau.

En el caso del objetivo de Michelson, un divisor de haz entre las lentes objetivo y el objeto bajo investigación desvía el haz de referencia de forma oblicua en un espejo de referencia. El divisor de haz se encuentra, por lo tanto, en un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje óptico de las lentes objetivo. Esto significa

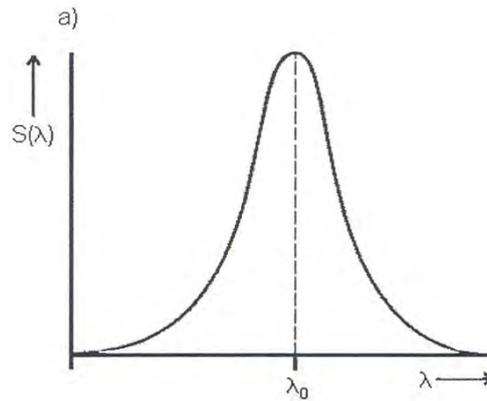
que, este tipo de objetivo requiere de un sistema de lentes con gran distancia de alejamiento. Así que, los objetivos con más de 5x, no están diseñados usualmente como objetivos Michelson, pero sí como, objetivos Mirau.

En el objetivo Mirau como el mostrado en la figura anterior, el haz de referencia es reflejado en la dirección del objetivo frontal por un divisor de haz. En el objetivo frontal se encuentra una réplica miniatura del mismo tamaño que la superficie de iluminación sobre el objeto bajo investigación. Por lo que para altas magnificaciones el espejo resulta tan pequeño que su efecto de sombreado puede ser ignorado. Moviendo el objetivo interferométrico se modifica la longitud del brazo de medición. La señal de interferencia de un pixel tiene una máxima modulación cuando la longitud del camino óptico de la luz que incide en el pixel es exactamente el mismo tanto para la referencia como para el haz objeto. Así que, los valores de Z para el punto sobre la superficie imagen de ese pixel, corresponde al valor Z de la etapa de posicionamiento en el que la modulación del correlograma es máxima.

#### **3.2.2.4 Relación entre ancho espectral y longitud coherente**

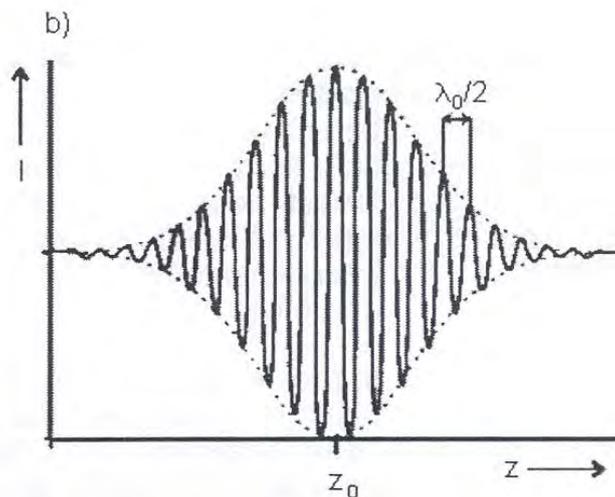
Como mencionamos con anterioridad, los valores Z de la etapa de posicionamiento cuando la modulación de la señal de interferencia para cierto pixel es máxima y definen el valor de la altura para ese pixel. Por consiguiente, la calidad y forma del correlograma tiene mayor influencia en la resolución y exactitud del sistema.

Los parámetros más importantes de la fuente de luz son su longitud de onda y su longitud de coherencia. La longitud de coherencia define el ancho del correlograma. Así que, el correlograma está una vez más relacionado con el ancho espectral de la fuente de luz. Por lo tanto, el ancho del correlograma depende del ancho espectral de la fuente de luz. En la figura 3.4 se puede observar la función de densidad espectral de la función de Gauss que es una buena aproximación al comportamiento de un LED.



**Figura 3.4.** Función de densidad espectral de la fuente de luz.

En la figura 3.5 se observa que la intensidad de la modulación correspondiente es substancial sólo en la vecindad de la posición  $Z$  en donde la referencia y el haz objeto tienen la misma longitud coherentemente superpuestos.



**Figura 3.5.** Intensidad de luz como función de la posición del espejo objeto.

El rango de  $Z$  en la etapa de posicionamiento en el que la envoltura de la intensidad de la modulación es más alta que  $1/e$  del valor máximo determina el ancho del correlograma. El ancho del correlograma corresponde a la longitud de coherencia, porque la diferencia entre la longitud del camino óptico es dos veces la longitud de la diferencia entre la longitud de la referencia y la longitud del brazo de medición del interferómetro [3].

La relación entre el ancho del correlograma, la longitud de coherencia y el ancho espectral se calcula con función espectral de Gauss. La función de densidad espectral normalizada es

$$S(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (3.1)$$

Donde  $2\Delta\nu$  es efectiva para anchos de banda  $1/\delta$ , y  $\nu_0$  es la frecuencia media. De acuerdo, a la generalización del teorema de Wiener-Khintchine [4], la función de autocorrelación del campo de luz está dada por la transformada de Fourier de la densidad espectral.

$$k(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) \exp(-i2\pi\nu\tau) d\nu = \exp(-\pi^2\tau^2\Delta\nu^2) \exp(-i2\pi\nu_0\tau) \quad (3.2)$$

La cual, se mide por la interferencia de la luz sobre el terreno de referencia y el haz objeto. En relación con el caso en el que las intensidades en ambos brazos del interferómetro son las mismas, la intensidad observada en la pantalla resulta en:

$$I(Z) = I_0 \text{Re}\{1 + k(\tau)\} \quad (3.3)$$

En donde,

$$I_0 = I_{obj} + I_{ref} \quad (3.4)$$

Además,  $I_{obj}$  y  $I_{ref}$  son las intensidades en el sensor del objeto y el brazo de referencia, respectivamente. La frecuencia promedio puede ser expresada como el promedio de la longitud de onda central, como:

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (3.5)$$

Y el ancho de banda efectiva como el promedio de la longitud de coherencia,

$$L_c = \frac{c}{\pi\Delta\nu} \quad (3.6)$$

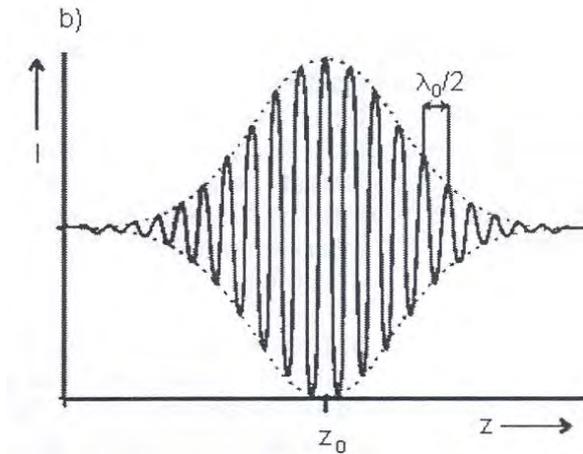
Lo que nos lleva a la siguiente ecuación que será la ecuación principal para nuestras evaluaciones y cálculos,

$$I(Z) = I_0 \left( 1 + \exp\left[-4\left(\frac{Z-Z_0}{L_c}\right)^2\right] \cos\left(4\pi\frac{Z-Z_0}{\lambda_0} - \varphi_0\right) \right) \quad (3.7)$$

Tomando en cuenta que,

$$\tau = 2 \cdot \left(\frac{Z-Z_0}{c}\right) \quad (3.8)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz, dicha ecuación describe el correlograma que se muestra en la figura 3.6, en la que se puede observar la distribución de la intensidad que se forma con la envolvente de Gauss con un periodo de modulación de  $\lambda_0/2$ .



**Figura 3.6.** Intensidad de luz como función de la posición del espejo objeto.

En realidad, cada pixel de la cámara muestrea el correlograma con un periodo de muestreo dependiente de la velocidad de la cámara y de la velocidad de la etapa de posicionamiento. Además, los cambios de fase en el reflejo de la superficie objeto, las imprecisiones en la etapa de posicionamiento, la diferencia de separación entre los brazos del interferómetro real, los reflejos de otras superficies diferentes a la superficie objeto, y el ruido que existe en el sensor de la cámara; conducen a la construcción de un correlograma deforme. Por lo que, el correlograma real puede diferir del correlograma que resulta de la ecuación a la que se llegó anteriormente. Sin embargo, deja claro que, existe una fuerte dependencia entre el correlograma y dos parámetros de la fuente de luz que son la longitud de onda y la longitud de coherencia.

### 3.2.2.5 Cálculo de la “envolvente máxima”

La envolvente está descrita por el término exponencial de la ecuación (3.7) que es,

$$E(Z) = \exp\left[-4\left(\frac{Z-z_0}{l_c}\right)^2\right] \quad (3.9)$$

El software del Analizador de Microsistemas MS-400 calcula la envolvente a partir de los datos del correlograma. El principio del cálculo de la envolvente es el remover el término del coseno de la ecuación (3.7). Con la ayuda de la transformación de Hilbert el término coseno se cambia por el término seno. La

envolvente se obtiene de la suma de las potencias del coseno y del seno de los correlogramas modulados.

$$E(Z) = \sqrt{\left(\exp\left[-4\left(\frac{z-z_0}{l_c}\right)^2\right] \cos\left(4\pi\frac{z-z_0}{\lambda_0}\right)\right)^2 + \left(\exp\left[-4\left(\frac{z-z_0}{l_c}\right)^2\right] \sin\left(4\pi\frac{z-z_0}{\lambda_0}\right)\right)^2} \quad (3.10)$$

Para el cálculo de la “envolvente máxima” se implementaron dos ligeramente algoritmos diferentes. El primer algoritmo hace uso de la evaluación de la envolvente, en el que el valor de Z se deriva de la envolvente máxima.

El segundo algoritmo, se usa como primer paso de la evaluación del “método de fase”. Se puede utilizar cualquiera de los algoritmos propuestos, gracias a la interface de automatización.

La incertidumbre del cálculo de la “envolvente máxima” depende principalmente de:

- La longitud de coherencia
- El periodo de muestreo del correlograma
- Desviaciones en los valores Z debido principalmente a vibraciones
- El contraste
- La rugosidad de la superficie

Por lo que, para mejores resultados se sugiere, una longitud de coherencia pequeña, periodo de muestreo pequeño, una muy buena aislación de vibraciones, un alto contraste y superficies preferentemente lisas.

### 3.2.2.6 Método de la evaluación de Fase

Debido al inevitable ruido en el correlograma de medición, existe una incertidumbre considerable en el cálculo de la “envolvente máxima”. Dicha incertidumbre, puede ser considerablemente reducida evaluando la fase  $\varphi_0$  de la ecuación (3.7), después de haber calculado la “envolvente máxima”. Sin embargo, la evaluación de dicha fase tiene ciertas restricciones:

- La superficie debe ser ópticamente lisa
- La superficie debe estar compuesta por un único material preferentemente, pues materiales diferentes generan cambios de fase

- La incertidumbre de la “envolvente máxima” debe ser menor a  $\pm \lambda/4$

Las mediciones que no son adecuadas para la evaluación de fase, muestran ya sea, escalones con una altura de  $\lambda/2$ , o en el caso de superficies rugosas, el tiempo de procesamiento aumenta considerablemente. Si se presentan escalones con alturas de  $\lambda/2$ , estos pueden desaparecer disminuyendo el periodo de muestreo [3].

### 3.3 Caracterización Dinámica de los MEMS dentro del plano

A pesar del crecimiento exponencial en la última década en cuanto a actividades de investigación y desarrollo se refiere, sólo algunos productos MEMS se encuentran comercialmente disponibles. Entre los que se incluyen acelerómetros, pantallas basadas en espejos digitales, micro inyectores de tinta y sensores de presión [3] [4]. La brecha entre la investigación y la comercialización de dichos productos se debe principalmente a la falta de fiabilidad y robustez de los componentes.

Por lo que la necesidad de contar con procedimientos simples y estandarizados que permitan realizar evaluaciones precisas de funcionamiento, confiabilidad y calidad de los dispositivos MEMS se ha incrementado cada vez más.

El completo desarrollo, proceso de optimización y control de calidad de los dispositivos MEMS requieren no sólo de la caracterización de su topografía y forma, sino también del análisis dinámico de alta resolución.

Las mediciones estáticas de los MEMS proporcionan información sobre los efectos de los factores geométricos, así mismo la medición de los factores dinámicos permite el estudio de la respuesta en frecuencia del sistema, la deformación, los rangos de funcionamiento y factores de calidad entre otras cosas del sistema completo durante su desempeño dinámico.

De ahí que, el completo desarrollo de los dispositivos MEMS se centra fundamentalmente en el diseño general y en los parámetros de optimización del elemento principal con respecto a los parámetros de la eficiencia deseada, por ejemplo, el desplazamiento, la fuerza, las limitaciones dimensionales, principio de actuación entre otras.

En este trabajo se revisarán dos técnicas ópticas utilizadas por el MSA-400 para la caracterización dinámica de dispositivos MEMS cuyo desempeño se realiza sobre el plano y fuera del plano.

### **3.3.1 El Analizador de Movimiento dentro del Plano (PMA)**

Para hacer posible la medición del movimiento en el plano de los dispositivos MEMS se aplica una técnica de iluminación con un estroboscopio. Con la utilización de la iluminación con luz estroboscópica y una cámara digital, los movimientos de alta velocidad hechos por los objetos se pueden congelar en el tiempo para capturar la posición exacta de dichos objetos.

El proceso del Analizador de movimiento en el plano garantiza un alto grado de precisión, y una modalidad de observación para el análisis en tiempo real tiempo.

El sistema está configurado para operar en bandas de frecuencias predefinidas ya seleccionadas para mediciones de vibraciones del dispositivo MEMS fuera del plano.

Una vez configurado, dichas mediciones de banda múltiple son procesadas automáticamente alrededor de las frecuencias de resonancia seleccionadas.

Los beneficios y características que ofrece el Analizador de movimiento sobre el plano son:

- Mediciones de movimiento en el plano con video estroboscópico con frecuencias de hasta 1 MHz
- Mediciones en el dominio del tiempo de desplazamiento con resolución nano métrica
- Generador de señales integrado para realizar mediciones de respuesta de señales de entrada escalón, escalón negativo y senoidal, esta última para generar diagramas de Bode
- Ahorro de tiempo, procesamiento automático de banda múltiple

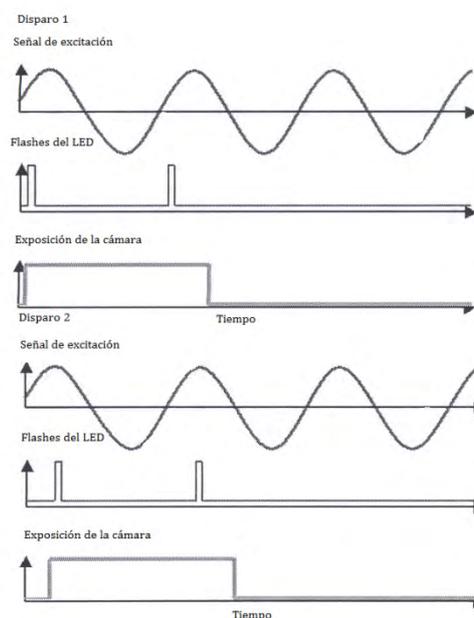
A continuación se revisará con más detalle las técnicas utilizadas por el Analizador de movimiento sobre el plano.

### 3.3.1.1 Máquina de visión estroboscópica

El Analizador de Movimiento Planar de Polytec PMA puede medir procesos periódicos con frecuencias de hasta 1 MHz. Para ello se utiliza una cámara a velocidad normal y empleando el principio de la luz estroboscópica es posible visualizar movimientos de alta frecuencia. El tiempo de resolución del sistema se determina con el ancho de pulso del LED de flash estrobo, pues la cámara no posee la velocidad necesaria para capturar eventos tan cortos.

El sensor CCD (Dispositivo Acoplado por Carga) no captura ninguna imagen cuando la luz estroboscópica está apagada. Esto significa que, la luz es registrada sólo durante los instantes del movimiento en los que la luz del flash está encendida, y los eventos pueden ser grabados por un periodo de tiempo aún menor al tiempo de exposición más corto de la cámara.

La señal de excitación del dispositivo MEMS que ocasiona su vibración, el LED de flash estrobo, y la cámara de exposición tienen que estar perfectamente sincronizados. A continuación en la figura 3.7 se muestra el diagrama de tiempo de la sincronización del Analizador de Movimiento sobre el Plano PMA para dos disparos de la cámara tomados en dos fases diferentes del periodo de excitación del dispositivo MEMS.



**Figura 3.7.** Diagrama temporal de la señal de sincronización.

En el ejemplo anterior, dos flashes del LED estrobo son usados dentro del periodo de exposición de la cámara digital. El número de flashes por disparo de

la cámara sólo puede ser incrementado hasta que el producto del número de flashes y el periodo de la señal de excitación (el total de la longitud de la secuencia) alcance el total de tiempo de exposición de la cámara. En el siguiente, una secuencia de flashes dentro del periodo de exposición de la cámara lo consideramos un disparo. El tiempo entre dos disparos es el ciclo de duración de la velocidad de cuadro de la cámara.

La fase de retraso de la iluminación estroboscópica con respecto a la señal de excitación se ajusta mediante el establecimiento de la demora de tiempo entre los disparos,  $T_{\text{disparo}}$  es un valor dado por:

$$T_{\text{disparo}} = n \cdot T_{\text{excitación}} + t_{\text{retraso fase}} \quad (3.11)$$

Donde,

n es un número entero

$T_{\text{excitación}}$  es el periodo de oscilación de la señal de excitación

$t_{\text{retraso fase}}$  es el cambio de tiempo de acuerdo al retraso de fase

La velocidad de cuadro máxima  $F_c$  de la cámara digital limita la frecuencia de disparo en  $F_c \geq 1/T_{\text{disparo}}$ . Todo el proceso del diagrama de tiempo se demuestra de forma simple cuando todas las imágenes necesarias para obtener la respuesta de desplazamiento sobre el plano del dispositivo MEMS son capturadas para una señal de excitación [7].

### 3.3.1.2 Parámetros importantes del sistema

El número de flashes por disparo de cámara no afecta el tiempo de resolución del sistema, pero es necesario para adaptar el brillo de las imágenes cuando se usan pulsos cortos del estrobo. Los pulsos cortos del estrobo son necesarios para poder congelar los movimientos rápidos de las micro estructuras. Una imagen borrosa ocurre cuando la micro estructura se mueve una distancia mayor que la distancia que corresponde al diámetro de un pixel de la cámara (323 nm para una magnificación de 20x) durante la iluminación estroboscópica. Es necesario un número pequeño de flashes por disparo (preferentemente un sólo flash) si es que el objeto no desempeña un movimiento periódico preciso [7].

### **3.4 Caracterización Dinámica de los MEMS fuera del Plano**

Como ya hemos visto el desarrollo de los MEMS requiere de altas resoluciones ópticas tanto para la caracterización estática como para la caracterización dinámica.

En el desarrollo de los MEMS existe una necesidad constante de comparar eficientemente las simulaciones numéricas con los movimientos reales de los dispositivos para así adaptar las características geométricas en el proceso de producción.

Para hacer posible la caracterización dinámica de los MEMS debemos realizar el análisis de la respuesta en frecuencia de las micro estructuras. Una vez que se obtiene la frecuencia de resonancia de las diferentes estructuras como: catilevers, juntas de flexión, micropuentes y membranas, será posible evaluar los efectos de factores geométricos durante el desempeño dinámico de los dispositivos.

Como ya hemos aprendido, para realizar la medición de los movimientos durante el desempeño real de los MEMS no se hace uso de técnicas convencionales sino de técnicas ópticas no invasivas.

Así que, se realizan mediciones ópticas de los movimientos de los microsistemas para caracterizar sus propiedades mecánicas. Dichos métodos brindan mediciones de las vibraciones fuera del plano dependiendo del desempeño de los dispositivos de ciertos puntos sobre la estructura en cuestión.

La tecnología del MSA-400 utilizada para la caracterización dinámica fuera del plano de microsistemas es capaz de detectar las vibraciones que se emiten por el movimiento de los sistemas en las distintas áreas de interés y con ello, a través de etapas de procesos digitales es posible obtener los diagramas de la respuesta en frecuencia de los sistemas así como, la simulación del desempeño de los microsistemas.

En las siguientes secciones de este capítulo se revisa más a detalle las técnicas utilizadas por el Vibrómetro de Micro Escaneo del MSA-400.

#### **3.4.1 El Vibrómetro de Micro escaneo (MSV)**

El vibrómetro con láser Doppler de Micro escaneo es el instrumento necesario para el desarrollo de microsistemas resonantes, pues ofrece un traductor óptico

de alta precisión para determinar la velocidad de vibración y desplazamiento en un punto de muestra. El sistema trabaja detectando el cambio súbito de frecuencia del láser en una superficie móvil.

Moviendo el punto de medición en diferentes posiciones predefinidas el escáner de láser Doppler brinda una fotografía completa del comportamiento vibratorio fuera del plano del dispositivo MEMS.

No hay frecuencias discretas en las que las mediciones puedan ser realizadas, sino que los datos de frecuencia por encima del ancho de banda del instrumento están disponibles en milisegundos por cada punto de muestra.

Las características y beneficios del Vibrómetro de Micro escaneo son:

- Mapeo vibratorio de banda ancha e información de la respuesta en frecuencia fuera del plano
- Datos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, simplificando el análisis de la respuesta transitoria
- Redes de muestra de alta densidad de hasta 512X512 puntos de medición definidos por el usuario
- Importación y exportación de datos versátiles para la validación de modelos FE
- Sonda de láser submicrónica para la medición de micro estructuras.
- Láser con potenciómetro para optimizar las condiciones de medición.

En las siguientes secciones se revisarán los principios de operación del Vibrómetro de microescaneo.

#### **3.4.1.1 La vibrometría con Láser Doppler**

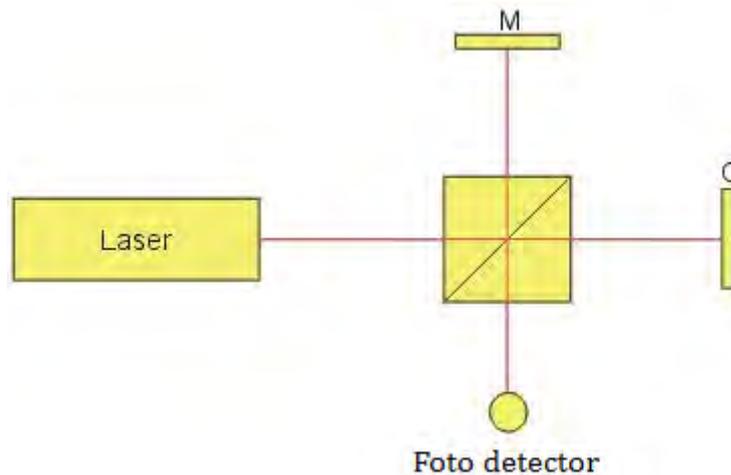
En general, podemos decir que la vibrometría con láser Doppler es una herramienta ampliamente aceptada para la caracterización dinámica de dispositivos MEMS. Pues es una técnica no táctil que permite la medición de superficies miniatura calientes o suaves.

#### **3.4.1.2 Principios de la vibrometría con láser Doppler**

Los vibrómetros láser se basan en el principio de detección del efecto Doppler de la luz láser coherente, que se dispersa en un área pequeña del objeto bajo estudio. Dicho objeto dispersa o refleja la luz del haz láser, y el cambio de

frecuencia Doppler es usado para medir la componente de velocidad que se encuentra a lo largo del eje del haz láser.

Como el láser tiene una frecuencia muy alta (aproximadamente  $4.74 \times 10^{14}$  Hz), una demodulación directa de la luz no es posible. Es por esta razón que se utiliza un interferómetro óptico para mezclar la luz dispersada coherentemente con el haz de referencia. El fotodetector mide la intensidad de la luz mezclada cuyo ritmo de frecuencia es igual a la diferencia de frecuencia entre la referencia y el haz de medición. Este arreglo puede ser un interferómetro de Michelson como el que se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3. 8.** Interferómetro de Michelson.

El haz del láser es dividido por un divisor en un haz de medición y un haz de referencia que se propagan en los brazos del interferómetro. Las distancias que la luz recorre entre el divisor de haz y cada reflector son  $x_R$  y  $x_M$ , el espejo de referencia es M y el objeto O.

Las fases ópticas correspondientes de los haces en el interferómetro son:

Referencia

$$F_R = 2kx_R \quad (3.12)$$

Medición

$$F_M = 2kx_M \quad (3.13)$$

Donde,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Generalmente se define

$$F(t) = F_R - F_M \quad (3.14)$$

El fotodetector mide la intensidad dependiente del tiempo en el punto donde el haz de la medición y el haz de referencia interfieren.

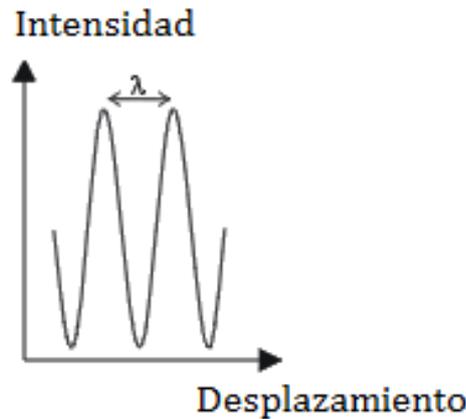
$$I(t) = I_R I_M R + 2k\sqrt{I_R I_S R} \cos(2\pi f_D t + \Phi) \quad (3.15)$$

Donde  $I_R$  y  $I_M$  son las intensidades de los haces de referencia y de la medición respectivamente,  $K$  es el coeficiente de eficiencia de la mezcla y  $R$  es la reflectividad efectiva de la superficie.

$$\text{La fase } F = 2\pi DL/\lambda \quad (3.16)$$

Donde  $DL$  es el desplazamiento ocasionado por la vibración del objeto y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz del láser.

Si  $DL$  cambia continuamente, la intensidad de la luz  $I(t)$  varía de forma periódica. Un cambio de fase  $F$  de  $2\pi$  corresponde a un desplazamiento  $DL$  de  $\lambda$ .



**Figura 3. 9.** Diagrama de Intensidad del haz contra desplazamiento de la superficie.

La tasa de cambio de la fase  $F$  es proporcional a la tasa de cambio de posición, que es la velocidad de vibración  $v$  de la superficie, lo que nos lleva a la ecuación bien conocida de la frecuencia Doppler  $f_D$ :

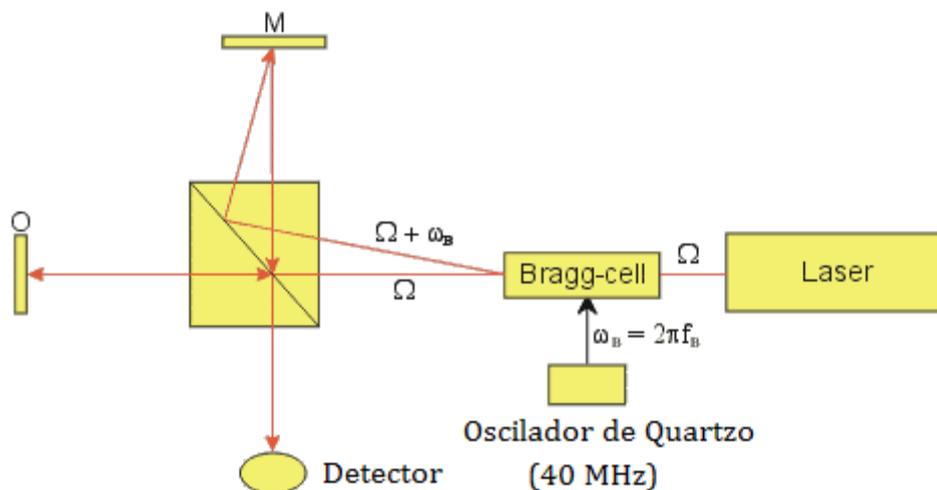
$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \quad (3.17)$$

Debido a la naturaleza senoidal del detector de señal, la dirección de la vibración es ambigua. Hay dos formas de introducir la dirección:

Introducir un cambio en la frecuencia óptica a uno de los brazos del interferómetro para obtener una compensación en la velocidad virtual.

Añadir componentes de polarización y un fotodetector adicional de tal forma que a la salida del interferómetro una segunda señal homodina ocurra en cuadratura con la salida del primer fotodetector.

La solución que se implementa en el MSA-400 es la primera que de hecho es la más utilizada. En esta solución un modulador opto acústico (Bragg cell) se incorpora en uno de los brazos del interferómetro. La celda de Bragg [8] maneja señales de 40 MHz o mayores, y genera una señal de portadora de RF. La frecuencia del movimiento del objeto modula la señal de portadora. La velocidad del objeto determina el signo y la cantidad de frecuencias de desviación con respecto a la frecuencia central  $f_B$ . Este tipo de interferómetro es conocido como interferómetro heterodino.



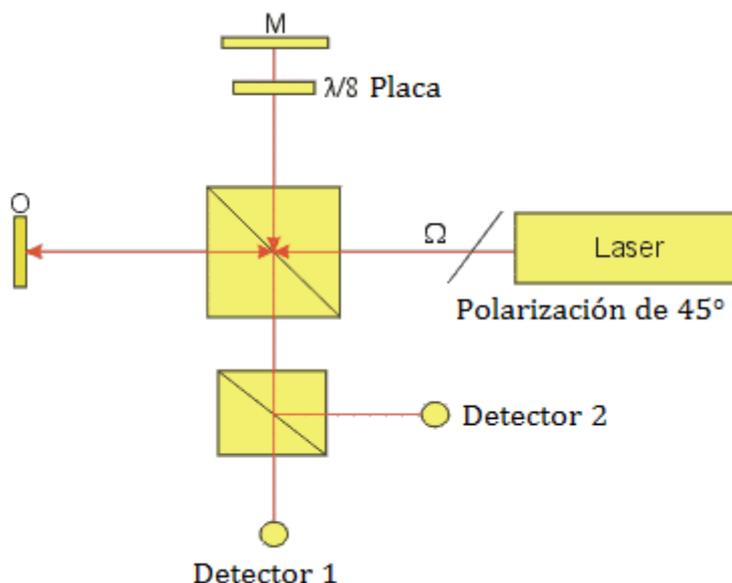
**Figura 3.10.** Diagrama de interferómetro heterodino.

Cuando introducimos el cambio de frecuencia  $f_B$  la intensidad en el detector cambia a:

$$I(t) = I_R I_M R + 2k \sqrt{I_R I_D R} \cos(2\pi[f_B - f_D]t + \phi) \quad (3.18)$$

La solución heterodina tiene ventajas significantes. Debido a que sólo se transmiten señales de AC a altas frecuencias no existe ninguna perturbación de zumbidos y ruidos, que normalmente se presentan con otro tipo de fuentes de alimentación. Además, los efectos no lineales del fotodetector así como, las etapas del procesamiento de señales, no afectan el contenido de la modulación Doppler. La alta eficiencia de la celda de Bragg utilizada en el MSA-400 produce menos pérdidas que los polarizadores utilizados en la segunda solución.

La solución dos, conocida como la cuadratura del interferómetro homodino, se diseña añadiendo placas de retardo de onda, un divisor de haz polarizado y un segundo detector, como en el sistema óptico que se muestra en la figura 3.11.



**Figura 3.11.** Diagrama de cuadratura del interferómetro homodino.

En dicho sistema el interferómetro utiliza la linealidad polarizada del láser orientada para dar una polarización de 45°. La luz en el brazo de referencia pasa dos veces a través de una placa retardadora de  $\lambda/8$  y la luz regresa al divisor de haz circularmente polarizado. Esto se puede ver como el vector suma de dos estados de polarización ortogonales. Después de los detectores 1 y 2 se un divisor de haz que separa las dos componentes ortogonales. Lo que da como resultado una relación de cuadratura en los detectores (salidas de seno y coseno). Para decodificar las señales del interferómetro homodino las señales banda base de ambos detectores se introducen en un bloque modulador que genera una portadora de RF modulada con la ayuda de un oscilador de frecuencia  $f_c$ . Para la decodificación de señales se puede procesar la fase para producir la salida de desplazamiento o se puede realizar la demodulación FM para proporcionar la velocidad de vibración del objeto [9]. Hasta ahora se ha revisado a detalle las técnicas empleadas por el Analizador de Microsistemas MSA-400 para realizar la caracterización estática y dinámica de los MEMS.

Sin embargo, en el capítulo 4 se explica a detalle la caracterización estática y dinámica en específico de una selección de dispositivos MEMS reportando los

resultados obtenidos, así como las conclusiones a las que se han llegado con la realización de este trabajo.

### 3.5 Bibliografía y Referencias

1. **Polytec.** [http://www.polytec.com/usa/158\\_6392.asp?](http://www.polytec.com/usa/158_6392.asp?)  
[http://www.polytec.com/usa/158\\_6392.asp?](http://www.polytec.com/usa/158_6392.asp?) [En línea] [Citado el: 10 de Agosto de 2008.]
2. **Bercu Bogdan, Montès Laurent, Morfouli Panagiota, Mathieu Nathalie.** *Simulation and 3D Characterization of Microsystems.* Grenoble, France : IMEP, ENSERG, Minatec, 2006.
3. **Polytec.** *Topography Measurement System software 2.0.* 41132-Man-TMS-Soft2.0-0206-01e.
4. **WIKIPEDIA.** [http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener-Khinchin\\_theorem.](http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener-Khinchin_theorem)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener%E2%80%93Khinchin\\_theorem.](http://en.wikipedia.org/wiki/Wiener%E2%80%93Khinchin_theorem) [En línea] [Citado el: 12 de Mayo de 2009.]
5. **Madou, M.J.** *Fundamentals of Microfabrication.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 1997.
6. **Lyshevski, Sergey Edward.** *Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-916-6.
7. **Polytec.** *Planar Motion Analyzer Software 2.3.*
8. **Wikipedia.** [http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic\\_modulator.](http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic\\_modulator.](http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator) [En línea] [Citado el: 14 de Mayo de 2009.]
9. **Polytec.** [http://www.polytec.com/usa/158\\_942.asp.](http://www.polytec.com/usa/158_942.asp)  
[http://www.polytec.com/usa/158\\_942.asp.](http://www.polytec.com/usa/158_942.asp) [En línea] [Citado el: 1 de Mayo de 2009.]

## **CAPÍTULO 4**

### **CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DE LOS MEMS**

En las secciones de este capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos tanto de la caracterización estática como dinámica de una selección de dispositivos MEMS mandados a fabricar bajo el proceso multiusuario estándar PolyMUMP's [1] de la compañía estadounidense MEMSCAP [2] dedicada a la fabricación de microsistemas entre otros productos tecnológicos.

En la primera sección se muestran y analizan los resultados obtenidos de la caracterización estática de los dispositivos MEMS, con sus respectivas sub secciones.

Posteriormente, se muestran y analizan los resultados obtenidos de la caracterización dinámica de los dispositivos MEMS. Cada una de estas secciones se ha dividido en dos partes, una de ellas para mostrar y analizar la caracterización dinámica dentro el plano, y otra para mostrar y analizar los resultados de la caracterización dinámica fuera del plano.

Cabe mencionar que en este capítulo únicamente me dedicaré a explicar el principio de operación de los dispositivos MEMS seleccionados, así como los resultados obtenidos. Y finalmente, mostraré las conclusiones generales de cada uno de los capítulos que conforman este trabajo.

#### **4.1 Caracterización Estática de los dispositivos MEMS**

La caracterización estática de los dispositivos MEMS consiste en obtener la topografía de las estructuras con el objetivo de verificar las dimensiones y condiciones de las superficies, y con ello determinar las características geométricas reales de los microsistemas en cuestión.

Para ello, como ya se ha mencionado en el capítulo 3 de este trabajo, se ha empleado el Sistema de Medición Topográfica (TMS) del Analizador de Microsistemas MSA-400 del Centro UNAMems.

Este sistema nos permite realizar un escaneo óptico no invasivo de las estructuras, procesando los datos para finalmente desplegar los resultados gráficamente en segunda y tercera dimensión.

Debido a que la caracterización estática no requiere del correcto desempeño dinámico de los dispositivos es posible obtener la topografía de cualquier

dispositivo MEMS, aun así se hizo una selección con base en las calidades visuales y topográficas de los microsistemas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización estática de los dispositivos MEMS seleccionados.

#### **4.1.1 Topografía de los MEMS**

Como ya se ha mencionado, los dispositivos MEMS que se caracterizaron fueron fabricados bajo el proceso multiusuario PolyMUMP's que, por supuesto tiene sus propias reglas de fabricación que le indican al diseñador las dimensiones y espesores que se deben respetar para que el proceso de fabricación tenga éxito.

Por esta razón, se ha decidido tomar como punto de comparación las plantillas que se enviaron al fabricante. En dichas plantillas aparece por capas las diferentes máscaras que se agregan durante el proceso de fabricación hasta obtener la estructura completa que se desea fabricar. La siguiente tabla muestra los espesores, materiales y nombres de dichas máscaras.

**Tabla 4.1.** Nombres, espesores y niveles de litografía del Proceso Multiusuario PolyMUMP's.

<b>Material de la Capa</b>	<b>Espesor (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Nombre del nivel de litografía</b>
Nitruro	0.6	-
Polisilicio 0	0.5	POLY0 (HOLE0)
Primer óxido	2.0	DIMPLE ANCHOR1
Polisilicio 1	2.0	POLY1 (HOLE1)
Segundo óxido	0.75	POLY1_POLY2_VIA ANCHOR2
Polisilicio 2	1.5	POLY2 (HOLE2)
Metal	0.5	METAL (HOLEM)

Así que se hizo una comparación de las mediciones hechas con el Sistema de Medición Topográfico con las capas correspondientes al proceso de fabricación. Enseguida, se muestran los resultados y el análisis dividido por dispositivos MEMS.

#### 4.1.1.1 Actuador Electro térmico en V

En primer lugar, se muestra en la figura 4. 1 la plantilla del actuador electrotérmico denominado *chevron* (cuya geometría es similar al logotipo de la compañía del mismo nombre) realizada en un software especial para el diseño de MEMS llamado MEMSPRO, en dicha plantilla se muestra la estructura final con las capas que la forman.

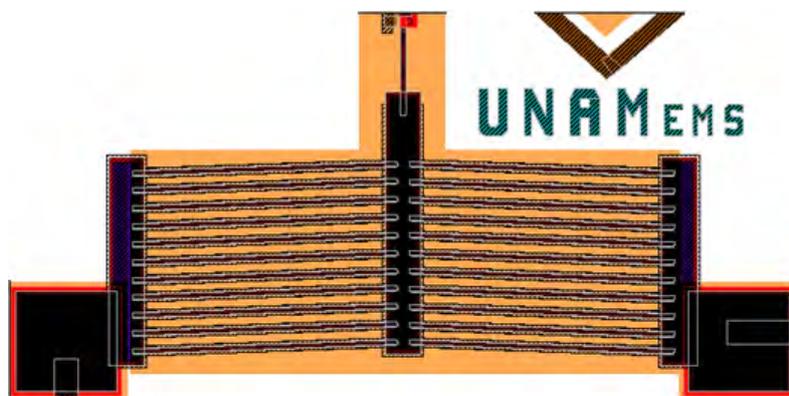
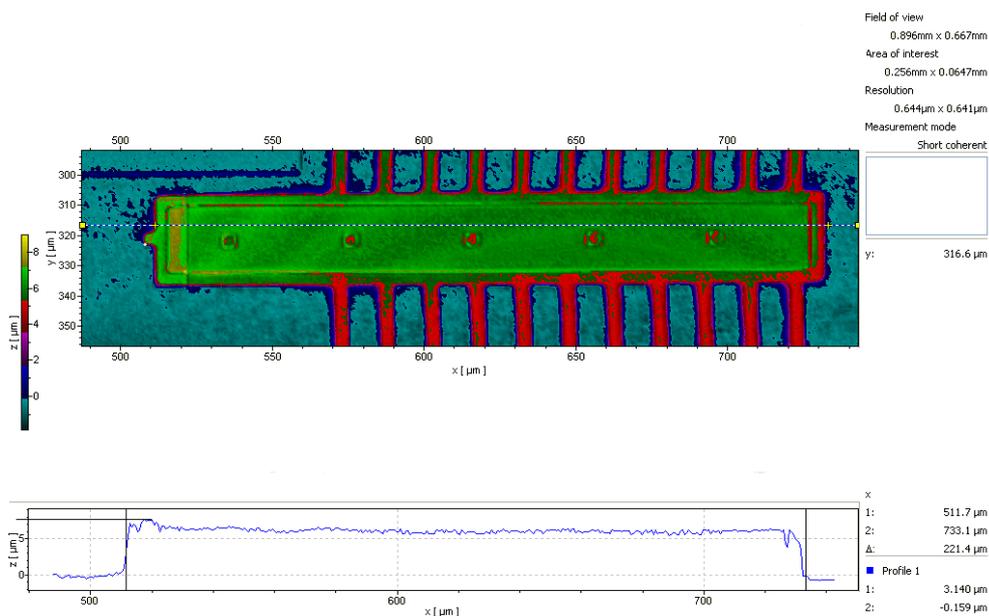


Figura 4.1. Plantilla del *chevron* en MEMSPRO.

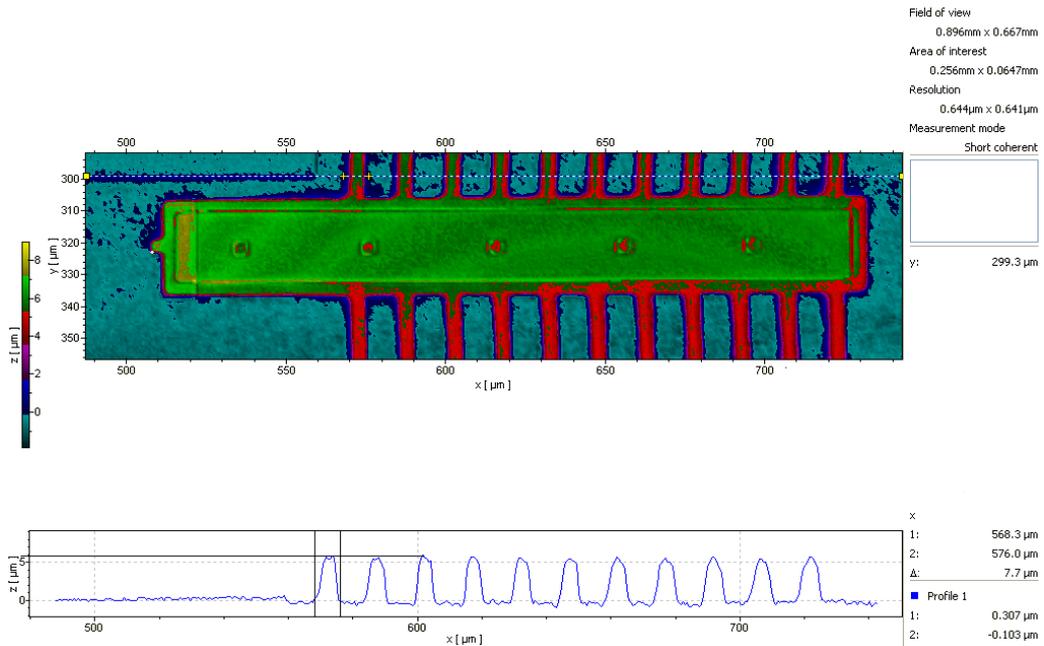
El *chevron* que se diseñó cuenta con las siguientes capas y niveles litográficos: la base que es el nitruro y no tiene nombre tiene un espesor de  $0.6 \mu\text{m}$ , la capa que sigue se llama POLY0 y tiene un espesor de  $0.5 \mu\text{m}$ , después siguen dos niveles litográficos DIMPLE y ANCHOR1 es el primer óxido y tiene un espesor de  $2.0 \mu\text{m}$ , después sigue la capa de POLY1 con un espesor de  $2.0 \mu\text{m}$ , después está el segundo nivel litográfico que se llama POLY1\_POLY2\_VIA e incluye a ANCHOR2 con un espesor de  $0.75 \mu\text{m}$ , después está la capa llamada POLY2 con un espesor de  $1.5 \mu\text{m}$ , y finalmente se encuentra la capa METAL con un espesor de  $0.5 \mu\text{m}$ .

Por lo que, si sumamos los espesores de las capas y los niveles litográficos anteriormente mencionados se obtiene el espesor total de la estructura que forma el *chevron* que se fabricó, que da un total de  $7.85 \mu\text{m}$ .

En la figura 4. 3 se muestra el resultado de la medición de la topografía en 2D del *chevron*. Como se puede observar en la gráfica que muestra el perfil del brazo principal se distingue la última capa de la estructura del brazo principal que es de metal que refleja la luz del láser y por consiguiente, resulta muy difícil obtener la medición. Sin embargo, en el perfil se logra distinguir un segmento de la capa de metal en color amarillo y, es posible obtener el espesor total de la estructura que es de  $7.85 \mu\text{m}$ .



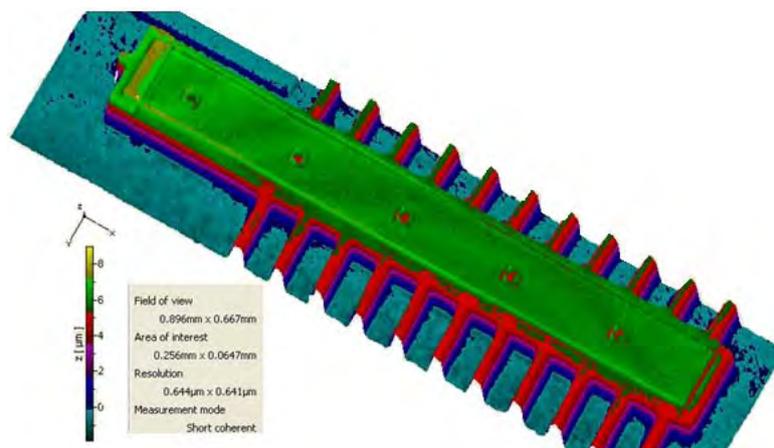
**Figura 4.2.** Topografía en 2D con perfil del brazo central del *chevron*. En el mismo perfil es posible medir la longitud del brazo principal que es de  $221.4 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.3.** Topografía en 2D con perfil de los brazos laterales del *chevron*.

En la figura 4. 3 se muestra la topografía en 2D del *chevron* y el perfil de los brazos laterales de la estructura. Cada brazo lateral de la estructura tiene un ancho de 7.7  $\mu\text{m}$  y un espesor de 6  $\mu\text{m}$ .

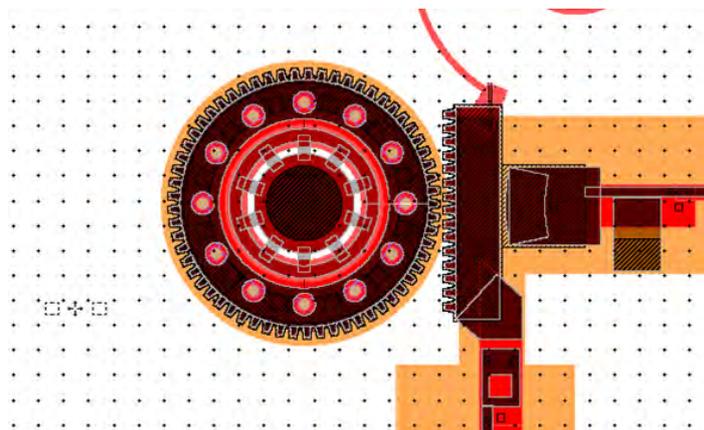
El Sistema de Medición Topográfica también nos permite ver los resultados de la topografía de la micro estructura en tercera dimensión como se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.4.** Topografía en 3D del *chevron*.

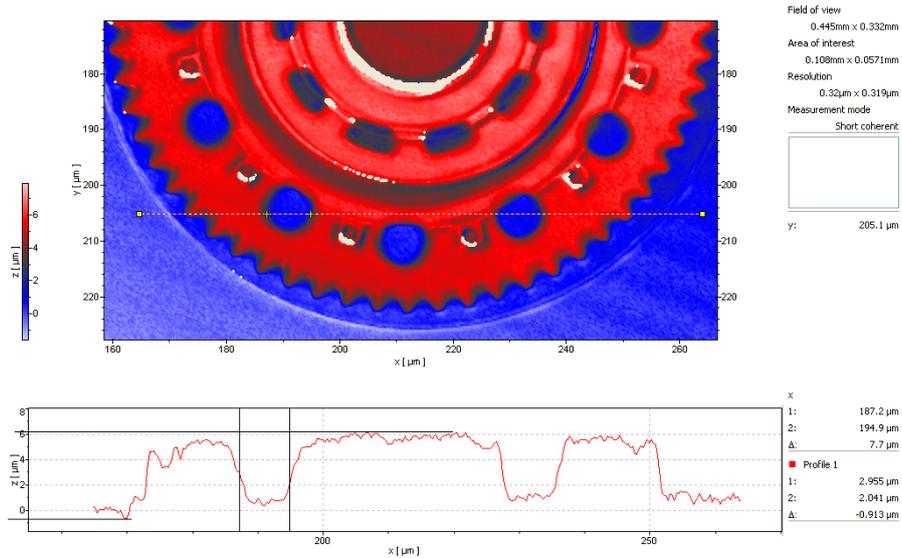
#### 4.1.1.2 Engrane

La estructura que se muestra a continuación es un engrane que tenía como propósito el ser girado por dos actuadores electro térmicos tipo *chevron*. Sin embargo, a pesar de que se localizó un error en las plantillas del diseño que dio como resultado que los vástagos quedaran pegados, los engranes en cuanto diseño y fabricación funcionan a la perfección.



**Figura 4.5.** Plantilla en MEMSPRO del engrane.

En la figura 4.5 se muestra la plantilla en MEMSPRO del engrane que se diseñó y cuenta con las siguientes capas y niveles litográficos: la capa del nitruro que es  $0.6\ \mu\text{m}$ , después está POLY0 con un espesor de  $0.5\ \mu\text{m}$ , luego DIMPLE ANCHOR1 con  $2\ \mu\text{m}$  de espesor, POLY1 con espesor de  $2\ \mu\text{m}$ , luego están los niveles litográficos POLY1\_POLY2\_VIA ANCHOR2 con un espesor de  $0.75\ \mu\text{m}$  y, finalmente se encuentra la capa que sigue es POLY2 con un espesor de  $1.5\ \mu\text{m}$ , esta estructura no cuenta la capa de METAL, lo que resulta en un espesor total de  $7.35\ \mu\text{m}$ .

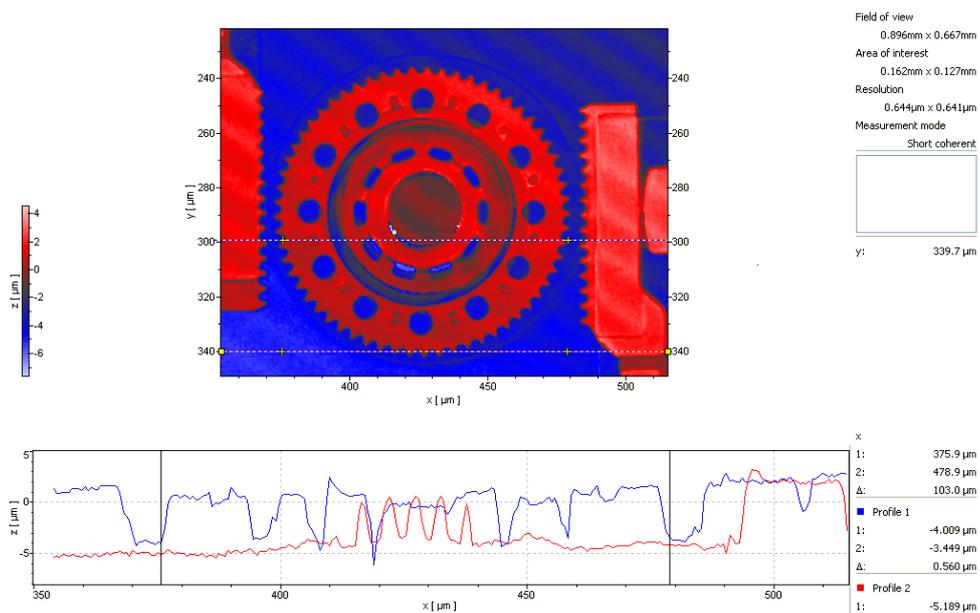


**Figura 4.6.** Topografía en 2D con espesor del engrane.

La figura 4.6 muestra la topografía en 2D del engrane y del perfil mostrado en la parte inferior de la figura se puede tomar la medición del espesor del engrane que resulta ser de 7.3  $\mu$ m.

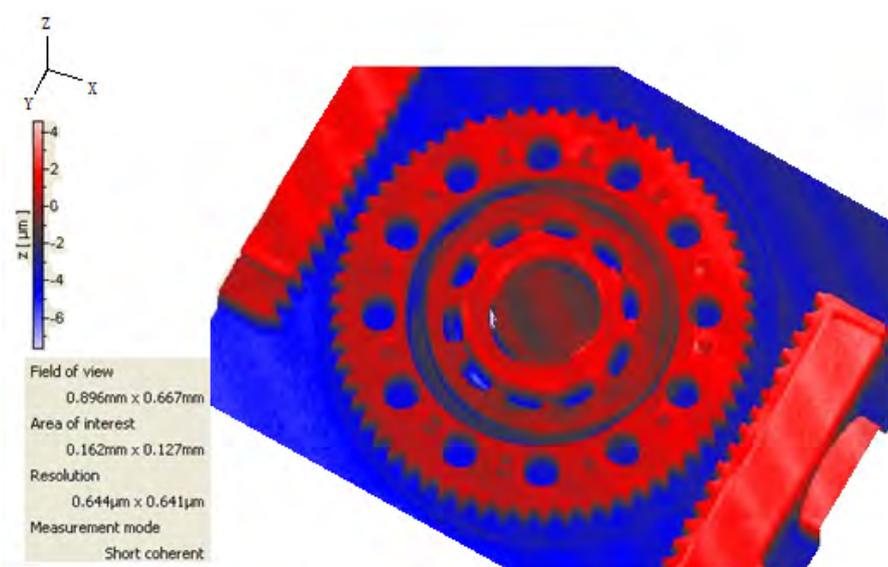
En la figura 4.7 se muestra otro perfil del engrane y la estructura completa del engrane, también se puede hacer la medición del diámetro que resulta de 103  $\mu$ m.

En la escala de color que se muestra del lado izquierdo de la estructura se puede observar en dos colores con diferentes intensidades los espesores que conforman a la estructura.



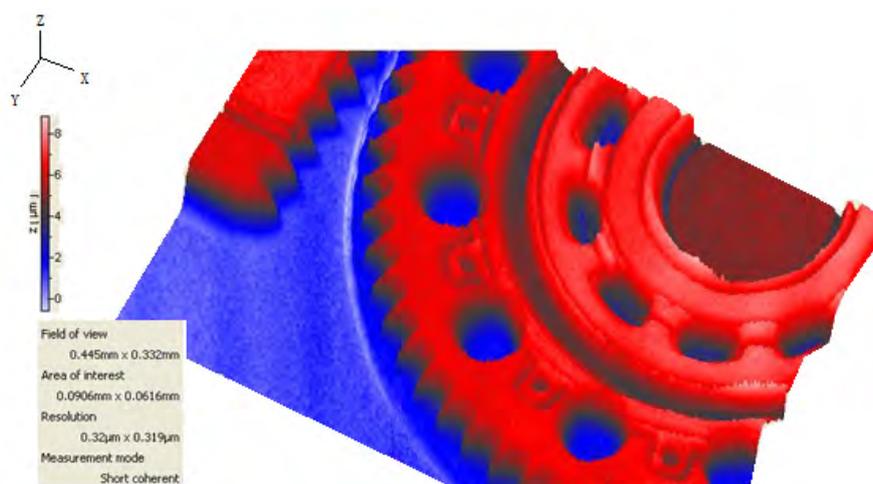
**Figura 4.7.** Topografía en 2D con diámetro del engrane.

En la figura 4.8 se muestra la topografía en tercera dimensión de la estructura completa del engrane, al igual que en la figura 4.7 se pueden observar los diferentes espesores de la estructura en la escala de color que aparece del lado izquierdo.



**Figura 4.8.** Topografía en 3D del engrane.

En la figura 4.9 se muestra con mejor calidad una parte de la estructura del engrane en la que se alcanzan a ver mejor los relieves de la estructura.



**Figura 4.9.** Topografía en 3D del engrane.

#### 4.1.1.3 Logo Pumas

En primer lugar se muestra en la figura 4.10 la plantilla en MEMSPRO del logotipo de pumas que se diseñó.

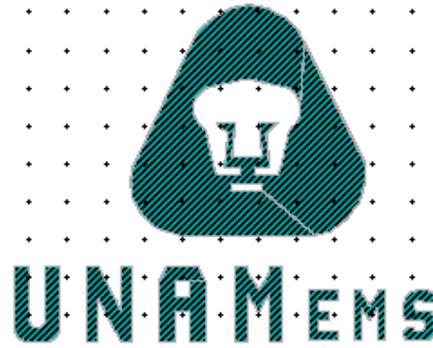


Figura 4.10. Plantilla en MEMSPRO del logotipo de Pumas.

Este diseño tiene las siguientes capas: la del nitruro con espesor de  $0.6 \mu\text{m}$  después está la capa de ANCHOR2 con un espesor de  $0.75 \mu\text{m}$ , las capa que sigue es la de POLY2 con un espesor de  $1.5 \mu\text{m}$ , y finalmente la capa de METAL que tiene un espesor de  $0.5 \mu\text{m}$ . Lo que da un total de  $3.35 \mu\text{m}$  de espesor de la estructura.

En la figura 4.11 se muestra la estructura en 2D del logotipo de pumas y podemos leer el espesor de la estructura y es de aproximadamente  $3 \mu\text{m}$ .

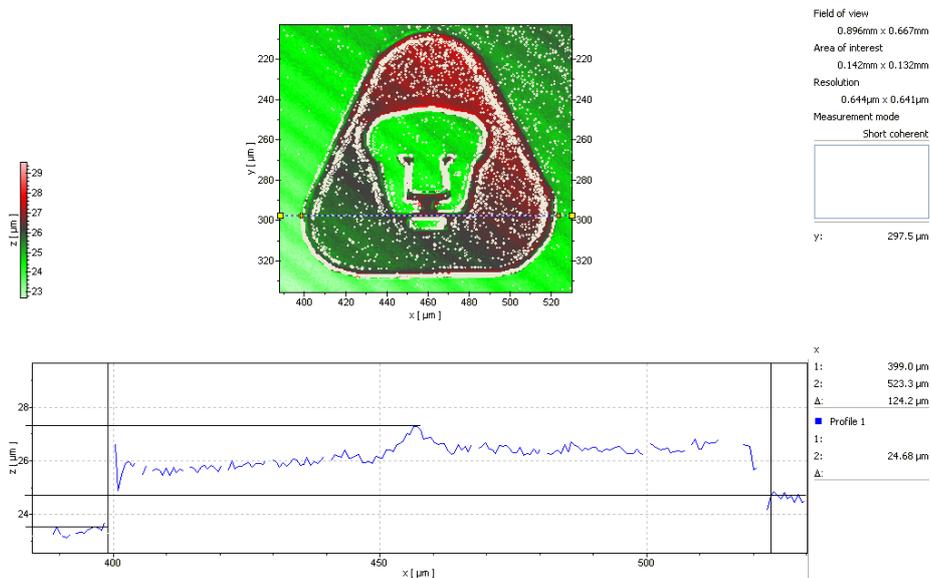
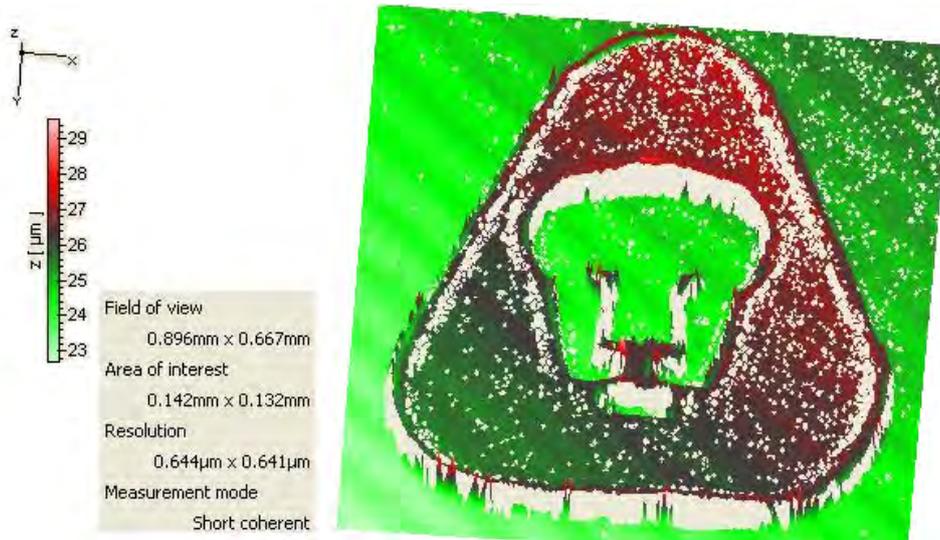


Figura 4.11. Topografía en 2D con perfil del logotipo de Pumas.

En la figura 4.12 se muestra la topografía en tercera dimensión de la estructura y se puede leer el espesor de la misma en la escala de color que se encuentra del lado izquierdo.



**Figura 4.12.** Topografía en 3D del logotipo de Pumas.

Con esto concluyo la sección de la caracterización estática de los MEMS, a continuación se muestran las secciones correspondientes a la caracterización dinámica de los MEMS seleccionados.

## 4.2 Caracterización Dinámica de los MEMS

En la caracterización dinámica de los MEMS es necesario emplear otras dos técnicas ya mencionadas en el capítulo 3 de este trabajo que son el Analizador de Movimiento dentro del Plano (PMA), y el Vibrómetro de Micro Escaneo para la caracterización fuera del plano (MSV), ambos disponibles en el Analizador de Microsistemas MSA-400.

Lo anterior, se debe principalmente a que los dispositivos MEMS generalmente se desplazan de dos formas, ya sea dentro del plano o fuera del plano. Es por eso que esta sección ha sido dividida en dos partes, la primera se refiere al desempeño mecánico de dispositivos MEMS dentro del plano, y la segunda parte a los que se desplazan fuera del plano.

### 4.2.1 Caracterización Dinámica dentro del Plano

Para realizar la caracterización dinámica de los MEMS dentro del plano se eligieron dos dispositivos con desempeño dinámico dentro del plano, esto de acuerdo a sus posibilidades de contar con buenas condiciones estructurales y topográficas; correcta actuación y correcto funcionamiento del microsistema.

Para ello, en primera instancia se hizo una revisión estructural de los dispositivos disponibles para de esta forma desechar los dispositivos que tuvieran alguna deformación no deseable o alguna estructura que no hubiera sido fabricada como era requerida en el diseño.

De dicha selección se realizó una segunda revisión con el fin de establecer los dispositivos MEMS con correcto desempeño con los que se contaban. Para lo que fue necesario hacer otra revisión, pero esta vez sobre el principio de operación de los dispositivos a caracterizar, esto para poder conocer el tipo de excitación y tipo de respuesta esperada, y sobretodo determinar si era posible medir los parámetros de desempeño dinámico del microsistema.

Cada uno de los dispositivos MEMS seleccionados fue caracterizado con el Analizador de Movimiento dentro del Plano del MSA-400 del Centro UNAMems basados en un tipo de análisis desarrollado de acuerdo al principio de funcionamiento en el que se basa el diseño de dichos dispositivos.

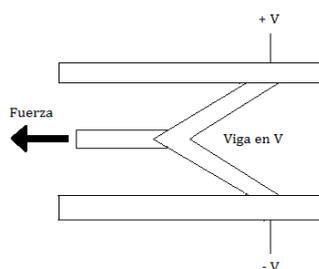
A continuación, se muestran las secciones correspondientes al principio de operación, tipo de análisis y resultados obtenidos para cada uno de los dispositivos MEMS seleccionados.

#### **4.2.1.1 Actuador Electro térmico en V**

##### **Principio de funcionamiento**

Los actuadores MEMS han sido típicamente menos útiles que los sensores MEMS debido a que la fuerza y la deflexión que pueden producir son muy pequeñas. Sin embargo, el modo de actuación más confiable en los dispositivos MEMS es la actuación electrotérmica en la que una pequeña resistencia es diseñada de tal forma que amplifica la expansión térmica debido al calentamiento del material por Efecto Joule produciendo una fuerza significativa y movimiento en una sola dirección. La actuación electrotérmica aplicada en dispositivos de micro escala ha demostrado ser una técnica compacta y con suficiente fuerza de actuación (3).

Quizá el uso más simple de los efectos térmicos en dispositivos MEMS sea directamente la expansión térmica. Un sistema típico es el que se muestra en la figura 4.13.



**Figura 4.13.** Esquema de un actuador electro térmico en V.

En dicho esquema una viga elástica está sujeta entre dos soportes rígidos. Cuando una corriente eléctrica se hace pasar a través de la viga da como resultado un incremento en la temperatura. Este incremento de temperatura provoca una expansión térmica en la viga. Y debido a que la viga no puede expandirse a lo largo de su eje ésta se tuerce. Si la viga está fabricada en forma de “V”, ésta se torcerá en una sola dirección. Una barra o cualquier estructura mecánica pegada a la viga permitirán que la fuerza de torsión sea redirigida para efectuar cualquier trabajo.

Respecto a este sistema se hace una observación muy importante, el uso de una corriente eléctrica como fuente de calor es típico en los MEMS conducidos por expansión electro térmica. De hecho, todos los dispositivos que se desempeñan por expansión electro térmica se basan en el Efecto Joule (4).

Dicho efecto tiene lugar cuando en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Este efecto es conocido como Efecto Joule en honor a su descubridor el físico británico James Prescott Joule. La causa de este fenómeno físico se debe a que los sólidos tienen generalmente una estructura cristalina, ocupando los átomos o moléculas los vértices de las celdas unitarias, y a veces el centro de la celda o de sus caras. Cuando el cristal es sometido a una diferencia de potencial, los electrones son impulsados por el campo eléctrico a través del sólido debiendo en su recorrido atravesar la intrincada red de átomos que lo forma. En su camino, los electrones chocan con estos átomos perdiendo parte de su energía cinética, que es cedida en forma de calor.

Este efecto fue definido de la siguiente manera: “la cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente”. Matemáticamente se expresa como sigue,

$$Q = I^2 R t \quad (4.1)$$

Donde,

Q = energía calorífica producida por la corriente

I = intensidad de la corriente eléctrica que circula y se mide en amperios

R = resistencia eléctrica del conductor y se mide en ohms

t = tiempo y se mide en segundos

Así, la potencia disipada por efecto Joule será

$$P = R I^2 = \frac{V^2}{R} \quad (4.2)$$

Donde V es la diferencia de potencial entre los extremos del conductor. En términos generales, podemos decir que la resistencia es el componente que transforma la energía eléctrica en energía calorífica. Luego, podemos enunciar la ley de Joule diciendo que la cantidad de calor desprendido por una resistencia es directamente proporcional a la intensidad de corriente a la diferencia de potencial y al tiempo (5).

Algunas aplicaciones de los dispositivos MEMS que utilizan actuación electro térmica son las micro máquinas lineales y rotacionales, actuadores dentro del plano y fuera del plano utilizados en interruptores ópticos, escaneo y arreglos de espejos, también existen micro pinzas de accionamiento utilizadas en operaciones de micro ensamblaje (6).

Enseguida, se muestran dos imágenes del *chevron* que se caracterizó en el centro UNAMems y las secciones correspondientes a los resultados obtenidos y el análisis efectuado.

## Imágenes del chevron

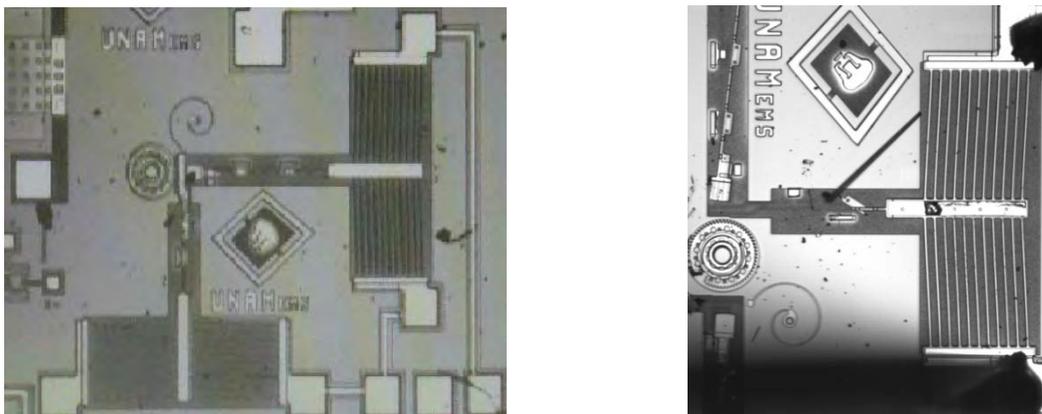


Figura 4.14. Imágenes del *chevron* electrotérmico.

## Análisis del sistema

Hasta este momento se ha revisado el principio de funcionamiento del sistema, en el que el sistema es excitado con una señal eléctrica provocando que el material de la estructura eleve su temperatura, se dilate y debido a su geometría éste se desplaza en un solo sentido dentro del plano, dando como resultado una respuesta dinámica.

Desde un punto de vista sencillo se puede ver el sistema completo como se muestra en el siguiente diagrama a bloques de la figura 4.15.

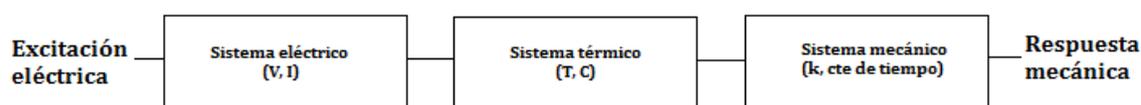


Figura 4.15. Diagrama de bloques del sistema electrotérmico.

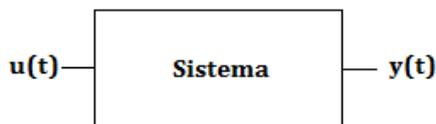
El diagrama a bloques del sistema electrotérmico nos muestra de forma muy sencilla lo que está ocurriendo. Se puede ver a cada uno de los bloques como transductores, pues de una entrada eléctrica con variables eléctricas (voltaje y corriente) obtenemos una reacción en el sistema térmico con sus respectivas variables térmicas (temperatura y capacidad térmica), que provocan una respuesta mecánica de primer orden con sus respectivas constantes que se asocian a un sistema en particular (ganancia y la constante de tiempo).

Como ya hemos visto, el MSA-400 por medio de su Analizador de Movimiento dentro del Plano nos permite obtener la respuesta dinámica del microsistema.

El analizador nos arroja los resultados de forma gráfica y a partir de dicha respuesta es posible hacer el análisis dinámico del microsistema.

Debido al tipo de respuesta que se obtuvo fue preciso definir a este microsistema como un sistema dinámico de primer orden.

En general, la respuesta dinámica de un sistema se puede representar en términos de la figura 4.16 que se muestra a continuación donde  $u(t)$  es la función variable de entrada,  $y(t)$  es la respuesta del sistema.



**Figura 4.16.** Respuesta de un sistema en presencia de una perturbación en la entrada.

La respuesta dinámica de muchos sistemas se puede representar mediante la siguiente ecuación diferencial de primer orden,

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t) \quad (4.3)$$

O de manera equivalente,

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Ku(t) \quad (4.4)$$

Donde,

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.5)$$

$$K = \frac{b}{a_0} \quad (4.6)$$

$K$  es la ganancia de lazo abierto del sistema y  $\tau$  la constante de tiempo a lazo abierto. Aplicando la transformada de Laplace en ambos lados de la ecuación (4.4) tenemos,

$$L\left\{\tau \frac{dy}{dt} + y\right\} = L\{Ku(t)\} \quad (4.7)$$

$$\tau L\left\{\frac{dy}{dt}\right\} + L\{y\} = KL\{u(t)\} \quad (4.8)$$

$$\tau sy(s) + y(s) = Ku(s) \quad (4.9)$$

$$(\tau s + 1)y(s) = Ku(s) \quad (4.10)$$

De donde,

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4.11)$$

Al cociente  $y(s)/u(s)$  se le denomina la función de transferencia  $G(s)$ , y para un sistema de primer orden la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4.12)$$

La solución de dicha ecuación en el dominio del tiempo está dada por

$$y(t) = uK(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.13)$$

De ahí que, las dos constantes características de un sistema lineal de primer orden son  $K$  y  $\tau$ , y se pueden evaluar a partir de información a lazo abierto del sistema. La constante de tiempo a lazo abierto  $\tau$  es una medida de la rapidez con la que un sistema determinado responde en presencia de alguna perturbación. La constante de tiempo se puede evaluar fácilmente de la ecuación (4.13) cuando  $t=\tau$ , lo que da como resultado

$$y = y_{\infty}(1 - e^{-1}) = 0.6321y_{\infty} \quad (4.14)$$

Dicha ecuación define a la constante de tiempo  $\tau$  como el tiempo en el que la respuesta del sistema alcanza el 63.21% de la respuesta final.

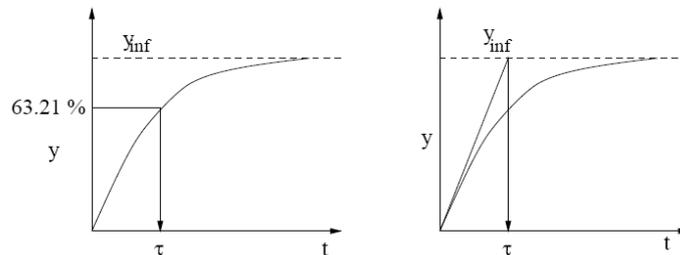


Figura 4.17. Interpretación de la constante de tiempo.

La ganancia estática  $K$  de un sistema de primer orden a lazo abierto es el valor del sistema cuando  $y$  es indefinido, como se muestra en la figura 4.18.

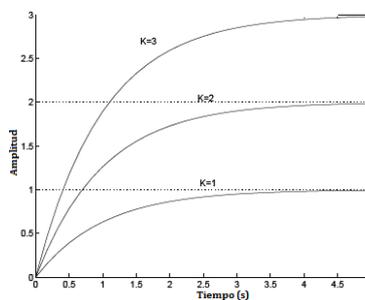


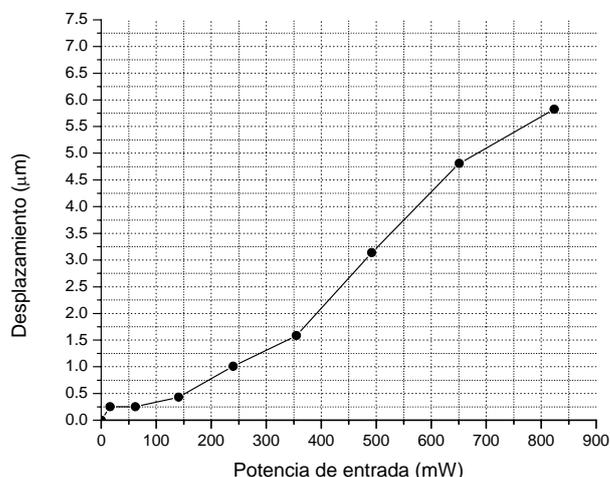
Figura 4.18. Efecto de la ganancia a lazo abierto sobre la respuesta de un sistema con  $\tau=1$ .

Como puede notarse para un sistema lineal de primer orden la respuesta del sistema cambia en función del factor K.

En la siguiente sección se mostrarán y analizarán las gráficas obtenidas de acuerdo con el análisis hecho en esta sección.

### Gráficas Obtenidas

Uno de los parámetros importantes en los microsistemas electro térmicos es la potencia requerida para hacer desplazar al dispositivo. Es por esto que se decidió obtener una gráfica en la que se mostrara la potencia aplicada al *chevron* y el desplazamiento que ésta produce.



**Figura 4.19.** Desplazamiento vs. Potencia de entrada del *chevron*.

Como se observa en la figura 4.19 la potencia necesaria para obtener el mayor desplazamiento (5.75 µm) es de 825 mW, simplemente se debe proporcionar un voltaje de corriente directa de 8 V como máximo para evitar cualquier daño a la estructura por sobrecalentamiento.

Ahora, para obtener la respuesta dinámica del *chevron* es necesario aplicar una señal de excitación que tenga como máximo 8 V de corriente directa, así que se eligió un tren de pulsos de 5 V con un offset de 1V.

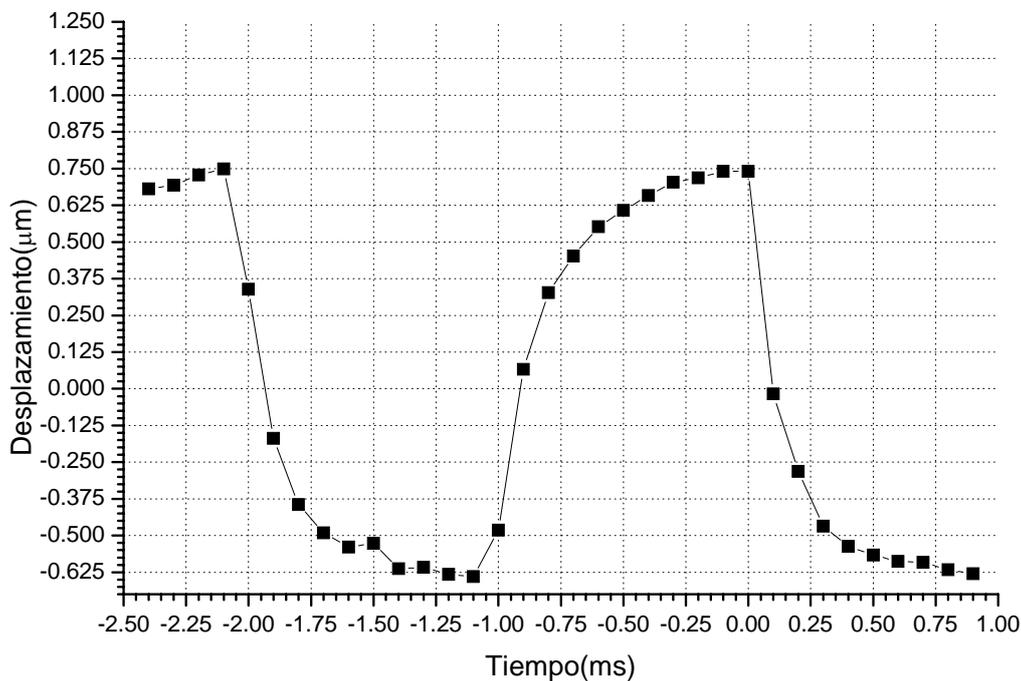


Figura 4. 20. Respuesta temporal del *chevron*.

Después de cambiar los ejes de referencia para poder obtener la constante de tiempo del sistema, la respuesta mecánica del sistema se muestra en la figura 4.21.

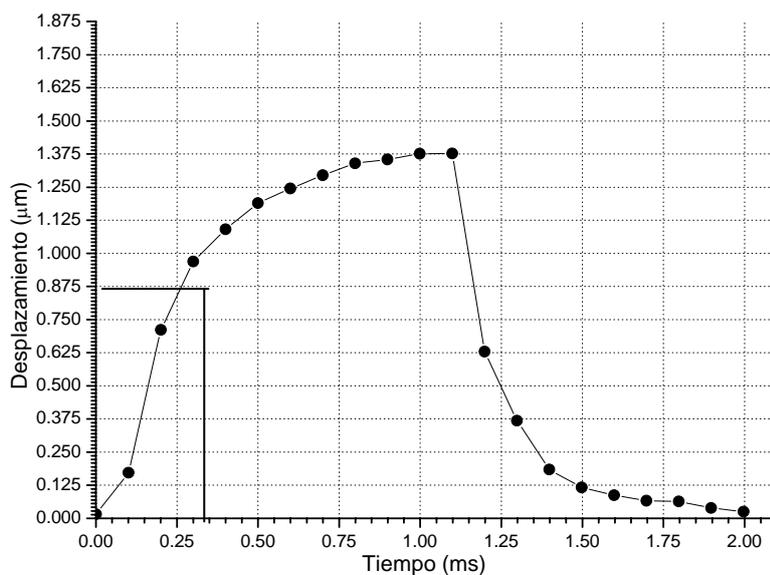


Figura 4. 21. Constante de tiempo del *chevron*.

Como las líneas lo indican el máximo de la respuesta del sistema es  $1.375 \mu\text{m}$  y el 63.21% de ese valor es  $0.8691375 \mu\text{m}$  y, por lo tanto, la constante de tiempo del sistema es  $\tau = 0.26 \text{ ms}$ , con una ganancia  $K = 1.375/8 \mu\text{m/V}$ .

#### 4.2.1.2 Hot Arm

##### Principio de funcionamiento

El *hot arm* como comúnmente se le conoce a este dispositivo, o brazo caliente, actúa bajo el mismo principio de funcionamiento que el *chevron* o actuador electrotérmico en V, ambos basados en el efecto Joule descrito en secciones anteriores.

La única diferencia estructural es que el *hot arm* cuenta con dos brazos, un brazo caliente y un brazo frío. Esto principalmente para superar la escasa fuerza del *chevron* visto en la sección anterior. En la figura 4.22 se muestra el esquema de dicho diseño de doble brazo.

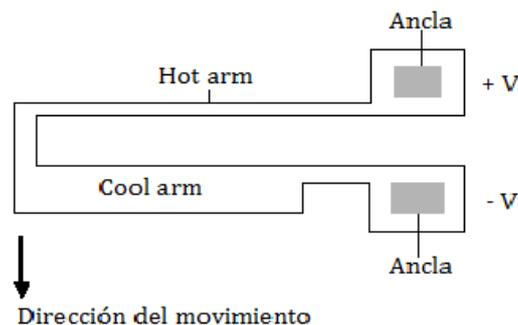


Figura 4.22. Esquema del *hot arm* simple.

En este sistema tanto el brazo caliente (*hot arm*) como el brazo frío (*cool arm*) están anclados al final de los brazos y libres de moverse en cualquier dirección. Se hace pasar una corriente eléctrica a través del sistema entero y viaja desde un ancla hasta la otra. Debido a que el brazo caliente es muy delgado en comparación con el brazo frío, la resistencia al flujo de corriente eléctrica del brazo caliente es mucho mayor. Esto significa que el efecto Joule causará un gran incremento en la temperatura en el brazo caliente mientras que la temperatura en el brazo frío permanecerá relativamente sin cambio. A su vez, tensiones térmicas grandes se desarrollarán en el brazo caliente, ya que tiende a expandirse debido al incremento en la temperatura, y la diferencia de

tensiones entre los brazos causará que el sistema entero se flexione en la dirección que se indica en la figura 4.22 [4].

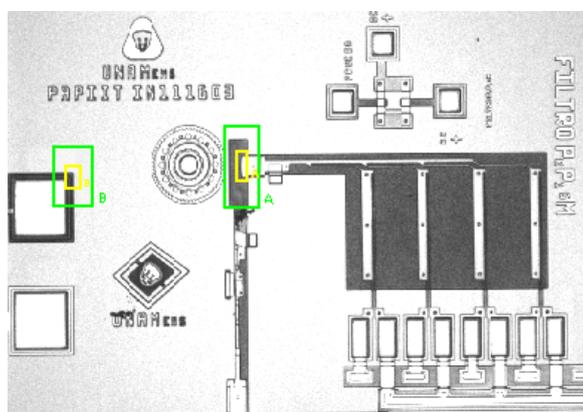


Figura 4.23. Imagen del sistema de *hot arm*.

### Gráficas Obtenidas

Al igual que con el *chevron* es importante conocer la potencia requerida para desplazar el vástago que es movido por el sistema de *hot arms* que se muestra en la figura 4.23.

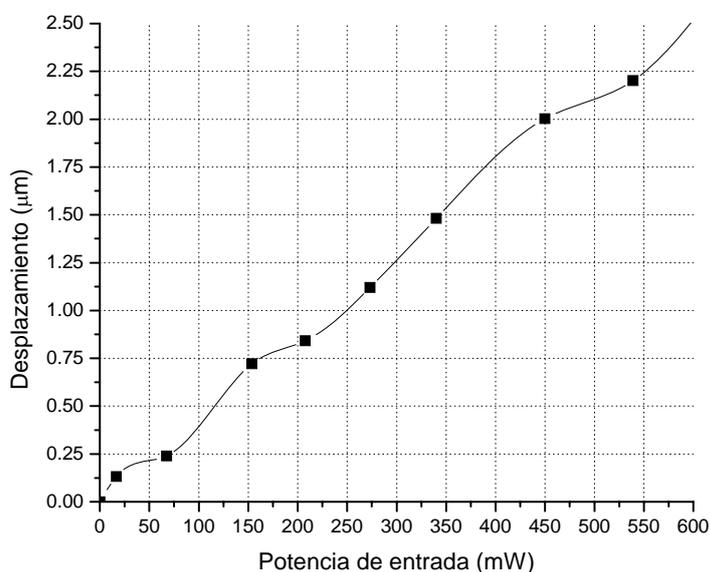
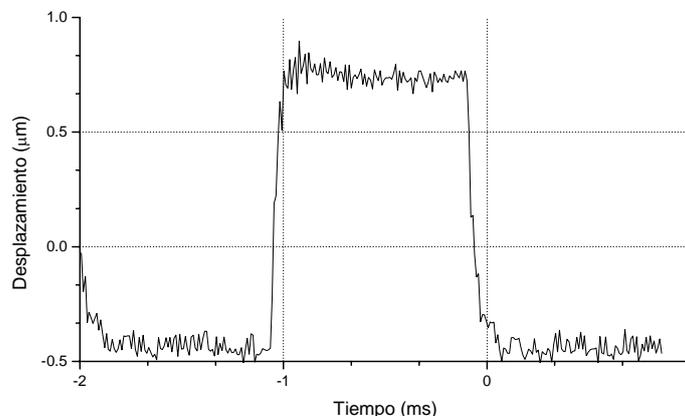


Figura. 4.24. Gráfica de Potencia de entrada vs. Desplazamiento del *hot arm*.

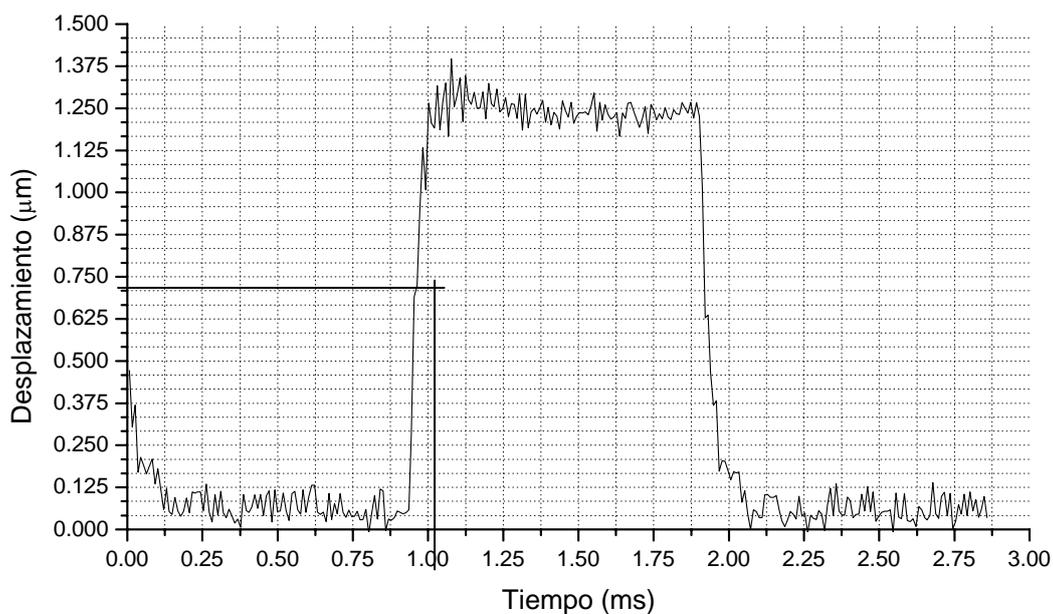
Como se puede ver en la figura 4.24, la potencia necesaria para obtener el máximo desplazamiento es de 636 mW con lo que se obtiene un

desplazamiento máximo de  $2.76 \mu\text{m}$  y un voltaje de actuación de  $12 \text{ V}$  como máximo.



**Figura 4.25.** Respuesta temporal del sistema de *hot arms*.

En la figura 4.25 se muestra la respuesta temporal del sistema. Y en la figura 4.26 se muestra la respuesta temporal del sistema y la obtención de la constante de tiempo del sistema.



**Figura 4.26.** Constante de tiempo del sistema de *hot arms*.

Como indican las líneas el valor promedio máximo de la respuesta del sistema es de  $1.250 \mu\text{m}$ , y el 63.21% de ese valor es  $0.790125 \mu\text{m}$  y por lo tanto, la constante de tiempo de este sistema es de  $\tau = 0.975 \text{ ms}$  y el factor de ganancia  $K = 1.250/12 \mu\text{m/V}$ .

Cabe señalar que la gráfica mostrada en la figura 4.26 bien podría corresponder a un sistema de segundo orden con una característica sub amortiguada. Lo cual es muy factible debido a que el sistema puede ser modelado como un sistema masa-resorte-amortiguador. Sin embargo, el ruido presente en las mediciones dificulta asegurar que la respuesta efectivamente sea la de un sistema de segundo orden, por lo que se decidió conservar el modelo de primer orden.

Con lo anterior, termino la sección dedicada a la caracterización dinámica dentro del plano, y en las siguientes secciones se muestran las que corresponden a la caracterización dinámica de los MEMS fuera del plano.

#### **4.2.2 Caracterización Dinámica fuera del Plano**

Para la caracterización dinámica fuera del plano como ya se mencionó en el capítulo 3 de este trabajo se hace uso del Vibrómetro de Microescaneo del MSA-400. Este vibrómetro nos permite obtener la respuesta dinámica del microsistema electromecánico fuera del plano.

Para ello, se han seleccionado tres microsistemas con desempeño fuera del plano, y en las siguientes secciones me refiero al principio de funcionamiento, gráficas obtenidas y análisis para cada uno de estos dispositivos.

##### **4.2.2.1 Resonador MEMS**

###### **Principio de funcionamiento**

Un área que ha tenido especial atención y aún presenta retos técnicos es la miniaturización de los filtros mecánicos. Estos filtros involucran la propagación mecánica de las ondas en algún momento tanto en sus terminales de entrada y como en sus terminales de salida dichas ondas suelen ser vibraciones.

Los resonadores son elementos clave en la realización de filtros, osciladores y amplificadores sintonizados. Estos circuitos son muy importantes en las arquitecturas de los receptores de los sistemas de comunicación.

Hoy en día, los sistemas de comunicación utilizan muchas clases de filtros y generalmente son clasificados como filtros pasa bajas, filtros pasa altas, filtros pasa banda o filtros supresores de banda, de acuerdo a la banda de frecuencia a las que transmiten. Sin embargo, los filtros más utilizados en los sistemas de comunicación son los filtros pasa banda con bandas de paso extremadamente angostas y rápida atenuación en ambos lados de la banda de paso (7).

El parámetro más importante de los filtros pasa banda se expresa en el factor de calidad Q (por sus siglas en inglés *Quality factor*), este factor es una medida de la energía almacenada en el sistema y la energía disipada en un ciclo. El factor de calidad se puede expresar en términos de la frecuencia como:

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (4.15)$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia central o frecuencia de resonancia, y BW es el ancho de banda del filtro. Cuanto mayor es el factor de calidad para una determinada frecuencia más estrecho es el ancho de banda y mayor es la selectividad del resonador que compone al filtro pasa banda.

Como se puede inferir los tres parámetros prácticos o características que determinan a un filtro pasa banda son: la frecuencia central o de resonancia, el ancho de banda BW, y el factor de calidad Q.

Para explicar la frecuencia central o de resonancia es importante saber que la resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura. Una frecuencia natural es la frecuencia en la que un sistema puede vibrar.

En circuitos eléctricos, la resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva para una frecuencia dada. La resonancia eléctrica es un fenómeno similar a la resonancia mecánica que se observa en un sistema formado por una masa sujeta al extremo de un muelle elástico. Se sabe que un sistema de este tipo es capaz de oscilar con una frecuencia característica, llamada frecuencia de resonancia y que es función del valor de la constante elástica del resorte y del valor de la propia masa. Igualmente, los resonadores eléctricos pueden oscilar a una frecuencia de resonancia que es

función de los valores del inductor y del capacitor. Estas oscilaciones naturales, intrínsecas y características del sistema, se manifiestan en ausencia de una señal de excitación, cuando simplemente dejamos que el sistema responda a una cierta cantidad de energía que, por cualquier procedimiento introduzcamos a él. Dichas oscilaciones naturales también se manifiestan cuando forzamos al sistema mediante una excitación exterior, si la excitación es armónica y hacemos variar su frecuencia, notaremos que a medida que la frecuencia de la excitación se acerca a la frecuencia de resonancia del sistema, la respuesta se amplifica cada vez más alcanzando un valor máximo cuando ambas frecuencias coinciden, si los resonadores fueran ideales la amplificación de la respuesta sería infinita.

En la práctica dicha amplificación puede llegar a ser muy grande y traer consecuencias desastrosas, pero en electrónica la resonancia tiene muchas aplicaciones prácticas. Por ejemplo, sin la resonancia sería imposible sintonizar las emisoras de radio difusión (8).

Por otro lado, el ancho de banda se define como la diferencia entre la frecuencia superior y la frecuencia inferior a las que la amplitud máxima de esta respuesta está atenuada 3 dB como se ilustra en la figura 4.28.

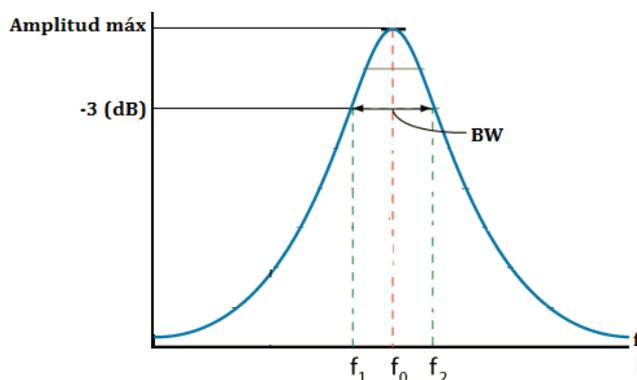


Figura 4.28. Gráfica ancho de banda de una señal.

Como ya hemos visto, las características necesarias en los sistemas de comunicación modernos son especiales y las tecnologías utilizadas resultan ser inadecuadas. Sin embargo, los resonadores micromecánicos de viga flexible han emergido recientemente como fuertes candidatos para diferentes aplicaciones en las comunicaciones. En particular, los filtros en RF y los osciladores para transmisores han sido beneficiados con la tecnología MEMS

que ofrece un bajo consumo de energía, tamaño pequeño y una alta integración con otros dispositivos.

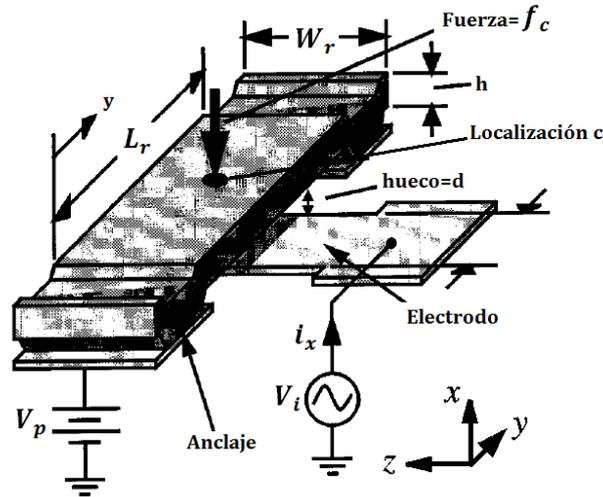
En esencia los resonadores electromecánicos MEMS ofrecen grandes ventajas sobre los resonadores electrónicos pasivos, ya que en los electromecánicos se pueden controlar el factor de calidad Q y la frecuencia de resonancia de una forma muy precisa por medio de las propiedades del material que están hechos, así como de sus dimensiones geométricas, a diferencia de los pasivos que dependen de los parámetros como las tolerancias en sus procesos de fabricación y la variación debido a la temperatura (8).

Existen tres tipos de resonadores MEMS que se han investigado y estudiado con más detalle, estos son el resonador doblemente anclado, el resonador doblemente libre y el resonador tipo disco (7).

El tipo de resonador que se caracterizó en este trabajo es el doblemente anclado, y de forma muy breve pero precisa se describe a continuación su principio de operación (9).

El resonador doblemente anclado físicamente consiste en una viga doblemente anclada colocada encima de un electrodo localizado en el centro de la viga. La viga tiene una cierta longitud  $L_v$ , un ancho  $W_v$ , y un espesor h, está hecha de un material con un módulo de Young E y una densidad de masa  $\rho$ . El electrodo tiene un ancho  $W_e$  y está separado de la viga por un hueco a una distancia d.

Lo anterior es en cuanto su estructura física, sin embargo, cuando el resonador se pone en operación, en una entrada se aplica un voltaje de DC ( $V_p$ ) y en la otra entrada un voltaje de AC ( $v_i$ ) ambos a través del hueco que se forma entre la viga y el electrodo, como se muestra en la figura 4.29.



**Figura 4.29.** Resonador micromecánico con polarización y configuración de excitación.

La combinación de dichos voltajes genera una fuerza electrostática entre el electrodo y la viga dada por:

$$F_e = V_p \frac{\partial C}{\partial x} v_i \quad [N] \quad (4.16)$$

Donde  $\frac{\partial C}{\partial x}$  es el cambio de la capacitancia entre el electrodo y la viga por unidad de desplazamiento, aproximadamente dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\epsilon_0 W_r W_e}{d_0^2} \quad \left[ \frac{C^2}{N \cdot m^2} \right] \quad (4.17)$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío y  $d_0$  es el hueco entre el electrodo y la viga resonadora bajo condiciones estáticas (no resonancia). Cuando la frecuencia de  $v_i$  iguala a la frecuencia de resonancia de la estructura, la viga comienza a vibrar con una amplitud de desplazamiento. Este desplazamiento que sufre la viga, en respuesta de  $v_i$ , induce una corriente expresada por:

$$i_x = V_p \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad [A] \quad (4.18)$$

Y resulta ser muy grande cuando la frecuencia de excitación es cercana a la frecuencia de resonancia mecánica de la viga expresada por:

$$f_{nom} = 1.03k \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{h}{L_r^3}} \quad [Hz] \quad (4.19)$$

Donde  $f_{nom}$  es la frecuencia de resonancia nominal si no hay disipación de voltaje en el electrodo, k es el escalamiento que modela el efecto de la topografía de la superficie. En general, esta frecuencia de resonancia se verá afectada por el voltaje de polarización  $V_p$  como se indica a continuación:

$$f_0 = f_{nom} \sqrt{1 - g(d, V_p)} \quad [Hz] \quad (4.20)$$

Donde  $g$  modela el efecto de la rigidez eléctrica. Además se muestra claramente que la frecuencia de resonancia depende del voltaje de polarización  $V_p$  y de la distancia entre el electrodo y la viga  $d$  y por lo tanto se verá afectada. En resumen, la frecuencia de resonancia de una viga doblemente anclada depende de muchos factores, como son: la geometría, las propiedades del material estructural, el esfuerzo, la magnitud del voltaje de polarización y la topografía de la superficie.

A continuación se presentan los resultados obtenidos y el análisis efectuado para cada uno de los resonadores MEMS caracterizados mecánicamente.

#### 4.2.2.2 Resonador 1

El primer resonador que se eligió es el que se muestra en la figura 4.30, como se puede observar este es un resonador que cuenta con dos vigas doblemente ancladas sobre un electrodo como el resonador MEMS anteriormente explicado.



**Figura 4.30.** Estructura del Resonador 1.

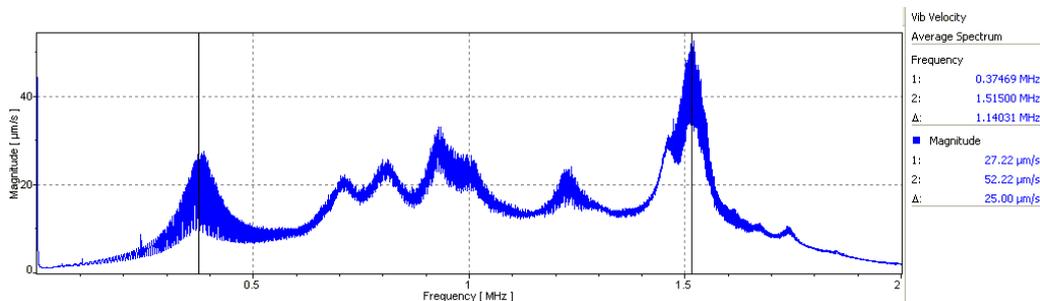
Así que, el resonador debe ser excitado con una señal de voltaje de AC y un offset en el anclaje de la viga. En primera instancia el resonador se excita con señal de ruido blanco para poder ubicar las diferentes respuestas mecánicas en una gráfica a diferentes frecuencias de la señal. Una vez ubicadas las respuestas mecánicas se eligen las que son producto de la resonancia mecánica de la viga tal y como se muestra en la figura 4.31.

El criterio que se aplica para elegir la respuesta requerida, es decir, la resonancia mecánica de la viga, es que el microescaneo de la estructura nos permite ver el movimiento de la micro viga a través de un video a una determinada frecuencia de la señal de excitación y con ello es posible encontrar la frecuencia de resonancia que se requiere para realizar la caracterización mecánica del resonador MEMS.

Ya teniendo la gráfica en la que se muestra la resonancia mecánica de la viga es posible obtener los parámetros que caracterizan al resonador que son: la frecuencia de resonancia  $f_0$ , el ancho de banda BW y el factor de calidad Q.

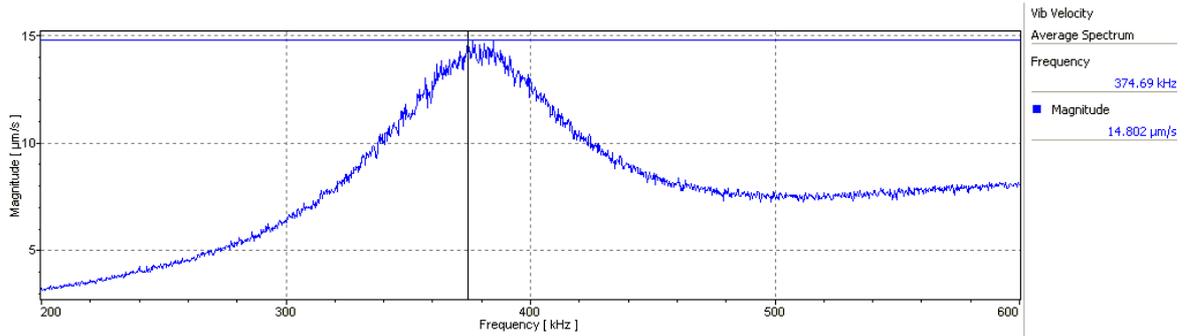
### Gráficas obtenidas y análisis del Resonador 1

En la figura 4.31 podemos ver la respuesta completa del resonador 1, cuando es excitado con una señal de ruido blanco con una amplitud de 5 V y un offset de 5 V, como ya se explicó el paso siguiente es localizar las posibles frecuencia de resonancia, y después elegir cuál de ellas es la que estimula la resonancia mecánica requerida.



**Figura 4.31.** Respuesta al ruido blanco del Resonador 1.

Para el caso del resonador 1 se tiene que la banda de frecuencias en la que el resonador se mueve de forma uniforme empieza en 200 kHz y termina en 600 kHz, por lo que, se elige una señal de excitación senoidal con una amplitud de 5 V y un offset de 5 V y una frecuencia de 375 kHz, lo que da como resultado la respuesta mecánica que se muestra en la figura 4.32.



**Figura 4.32.** Frecuencia de Resonancia del Resonador1.

Una vez obtenida la gráfica de la respuesta mecánica del resonador, la frecuencia de resonancia del resonador se localiza en la magnitud máxima de la velocidad con que se mueve la viga, en otras palabras es el desplazamiento de la viga por unidad de tiempo, en respuesta a  $v_i$ . Como se observa en la gráfica 4.32 para el resonador 1 la frecuencia de resonancia es:

$$f_0 = 374.69 \text{ [kHz]} \quad (4.21)$$

Lo siguiente es obtener el ancho de banda del resonador 1, que por definición resulta ser la magnitud máxima que en este caso es la velocidad máxima de la viga multiplicada por  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ . Esto se debe a que basados en la ecuación (4.18) que es la corriente que se induce en respuesta a  $v_i$ :

$$I_w = V_p \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \text{ [A]} \quad (4.18)$$

En donde  $\frac{\partial x}{\partial t}$  es el desplazamiento sufrido por la viga por unidad de tiempo, es decir, la velocidad con que la viga se desplaza al ser excitada por  $v_i$ .

Y  $\frac{\partial C}{\partial x}$  es simplemente el cambio de capacitancia de la viga definida anteriormente por la ecuación (4.17):

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\epsilon_0 W_T W_B}{d_0^3} \text{ [C}^2 \text{ / N} \cdot \text{m}^3 \text{]} \quad (4.17)$$

Es posible ver que la respuesta se ve afectada directamente por el cambio en la velocidad de la viga. Por lo que, para definir el ancho de banda simplemente se toma la máxima magnitud de la velocidad (en la frecuencia de resonancia de la viga) y se multiplica por  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ :

$$|\text{velocidad}_{\text{máx}}| * \frac{1}{\sqrt{2}} = \left( 14.802 \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{s}} \right] * \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 10.4664 \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (4.22)$$

Con el valor dado por la ecuación (4.22) para el caso del resonador 1 se localizan los valores correspondientes a  $f_1$  y  $f_2$  como se muestra en la figura 4.33.

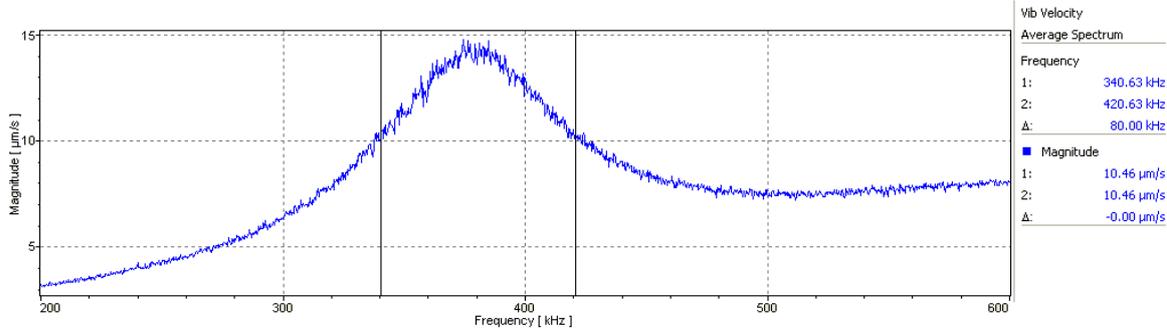


Figura 4.33. Ancho de Banda del Resonador 1.

Ya localizados los valores de las frecuencias aplicamos la ecuación que define al ancho de banda dado por:

$$BW = f_2 - f_1 \text{ [Hz]} \quad (4.23)$$

El ancho de banda para el resonador 1 es:

$$BW = f_2 - f_1 = 420.63 - 340.63 = 80.00 \text{ [kHz]} \quad (4.24)$$

Finalmente, se obtiene el factor de calidad del resonador 1 definido por:

$$Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{374.69}{80.00} = 4.68625 \quad (4.25)$$

Como un dato extra en la gráfica 4.34 se muestra el desplazamiento máximo de la viga, es decir, en la frecuencia de resonancia:

$$d_{m\acute{a}x} = 6.2874 \text{ [pm]} \quad (4.26)$$

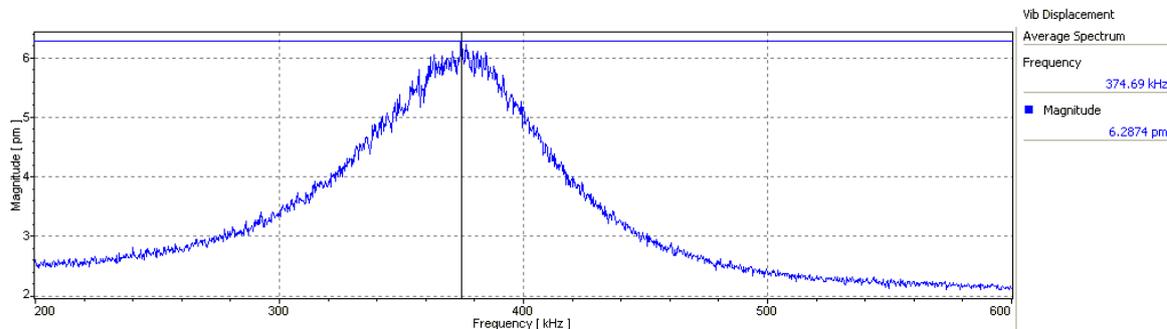
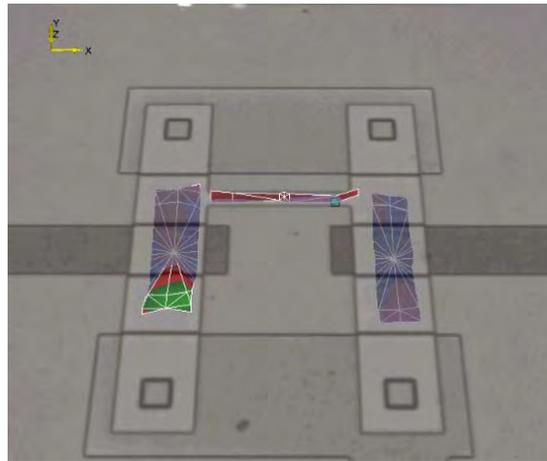


Figura 4.34. Máximo desplazamiento del Resonador 1.

### 4.2.2.3 Resonador 2

El segundo resonador que se eligió es el que se muestra en la figura 4.35, al igual que el resonador 1 es un resonador MEMS doblemente anclado con dos vigas con una tercera viga acopladora de movimiento.



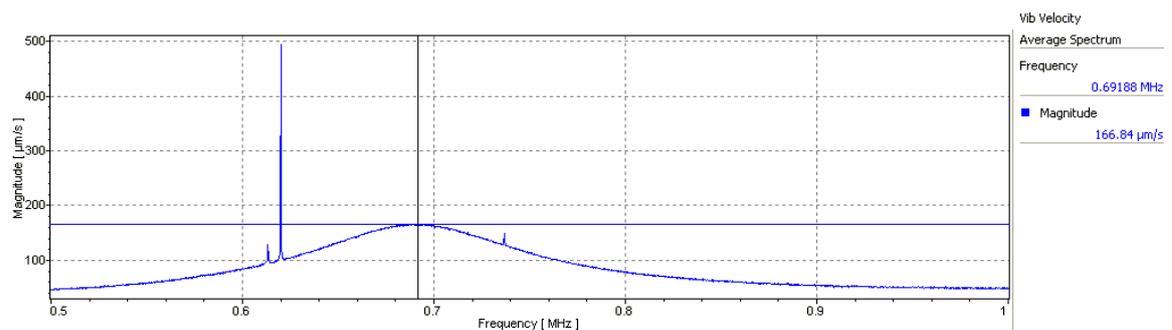
**Figura 4.35.** Estructura del Resonador 2.

La diferencia entre el resonador y el resonador 2 radica en que el resonador 2 no tiene una estructura sobre las vigas resonantes lo que le da mayor a las vigas libertad de movimiento.

El procedimiento para obtener la respuesta mecánica del resonador 2 es el mismo que el anterior. Así que, para no repetir el procedimiento simplemente mostraremos los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

### Gráficas obtenidas y análisis del Resonador 2

La gráfica que se muestra en la figura 4.36 corresponde a la respuesta mecánica del resonador 2 cuando es excitado con una señal senoidal con una amplitud de 5 V, con un offset de 5 V y una frecuencia de 692 kHz.



**Figura 4.36.** Frecuencia de Resonancia del Resonador 2.

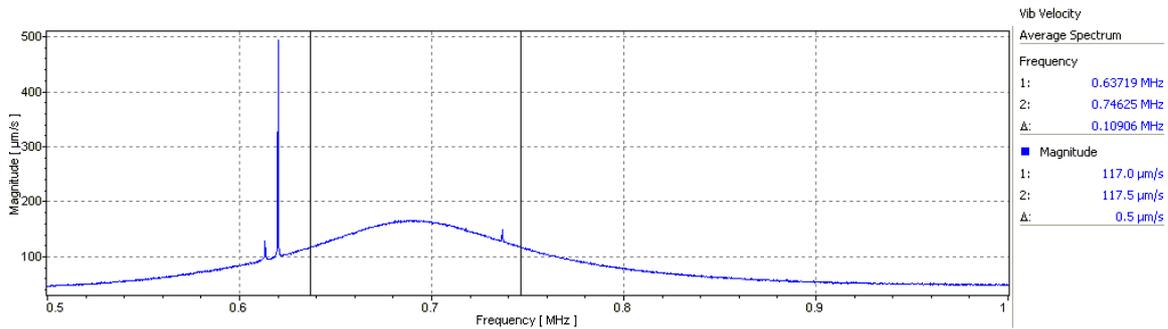
Como se observa en la gráfica la máxima magnitud de velocidad de las vigas se alcanza en la frecuencia de resonancia del resonador:

$$f_0 = 691.88 \text{ [kHz]} \quad (4.27)$$

Para obtener el ancho de banda del resonador 2 es necesario obtener los valores de las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  cuando:

$$|\text{velocidad}_{\text{máx}}| * \frac{1}{\sqrt{2}} = \left( 166.84 \left[ \frac{\mu\text{m/s}}{\text{s}} \right] * \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 117.97 \left[ \frac{\mu\text{m/s}}{\text{s}} \right] \quad (4.28)$$

Se localizan dichas frecuencias tal y como se muestra en la figura 4.37.



**Figura 4.37.** Ancho de Banda del Resonador 2.

Así que, el ancho de banda del resonador 2 es aproximadamente:

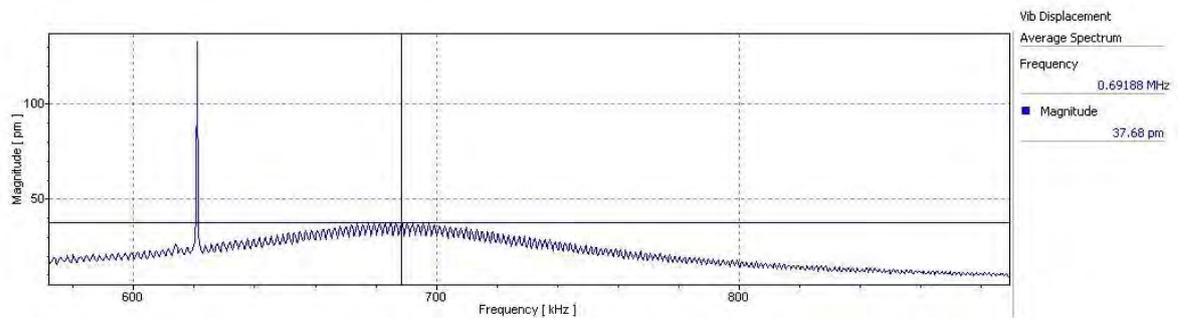
$$BW = f_2 - f_1 = 746.25 - 637.19 = 109.06 \text{ [kHz]} \quad (4.29)$$

Finalmente definimos el factor de calidad Q del resonador 2 dado por:

$$Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{691.88}{109.06} = 6.344 \quad (4.30)$$

Como dato extra se muestra en la figura 4.38 el desplazamiento máximo de las vigas en la frecuencia de resonancia del resonador 2.

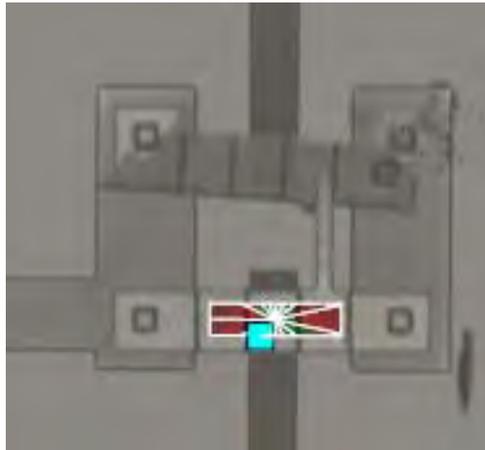
$$d_{\text{máx}} = 37.68 \text{ [pm]} \quad (4.31)$$



**Figura 4.38.** Máximo desplazamiento del Resonador 2.

#### 4.2.2.4 Resonador 3

Por último, el resonador 3 que se muestra en la figura 4.39 fue elegido ya que debido a que sufrió la ruptura de una de las vigas resonantes y de esta forma fue posible caracterizar mecánicamente una sola de las vigas resonantes para comprobar que a menor longitud y masa de la viga mayor será su frecuencia de resonancia.



**Figura 4.39.** Estructura del Resonador 3.

Al igual que los resonadores anteriores el procedimiento para la obtención de sus parámetros característicos se aplican para este resonador.

En primer lugar, se excita el resonador con una señal de ruido blanco con una amplitud de 5 V y un offset de 5 V. Una vez que se obtiene el movimiento uniforme de resonancia se excitó con una señal senoidal con una amplitud de 5 V, con un offset de 5 V y una frecuencia de 1.5 MHz, para obtener la respuesta mecánica de resonancia del resonador 3.

Una vez que se obtiene la respuesta mecánica de la viga en estado de resonancia se procede a hacer el análisis para la obtención de los parámetros característicos del resonador 3.

#### **Gráficas obtenidas y análisis del Resonador 3**

En la figura 4.40 se muestra la respuesta mecánica del resonador 3 y como se observa en la gráfica la frecuencia de resonancia mecánica se localiza cuando la magnitud de la velocidad de la viga resonante es máxima:

$$f_0 = 1.51750 \text{ [MHz]} \quad (4.32)$$

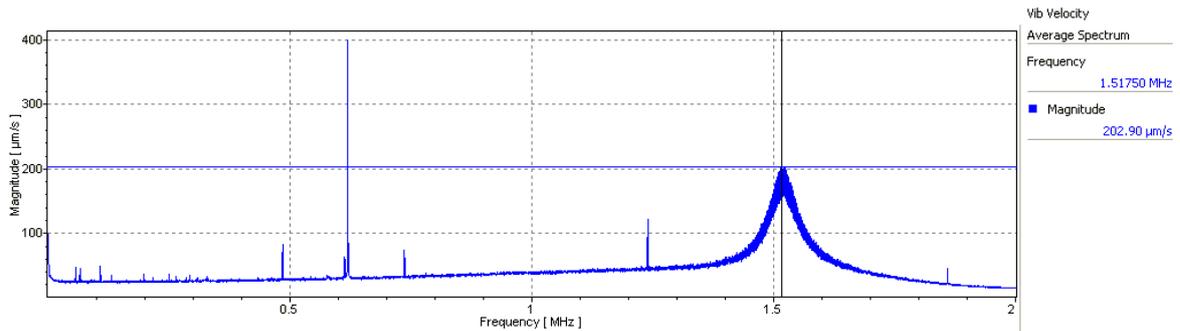


Figura 4.40. Frecuencia de Resonancia del Resonador 3.

El siguiente paso es definir y calcular el ancho de banda del resonador 3 para lo que se tienen que localizar las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , como se muestra en la figura 4.41, en las que se localizan las magnitudes que corresponde a:

$$|velocidad_{m\grave{a}x}| * \frac{1}{\sqrt{2}} = \left( 202.90 * \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 143.47 \left[ \frac{\mu m}{s} \right] \quad (4.33)$$

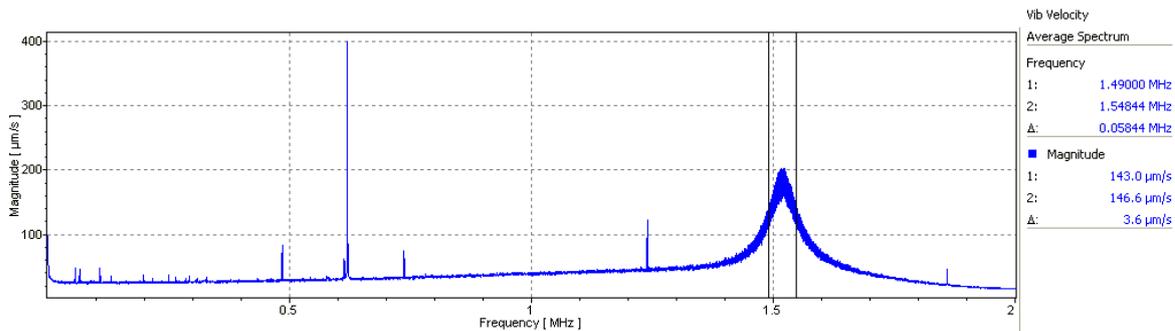


Figura 4.41. Ancho de Banda del Resonador 3.

De tal forma que, el ancho de banda queda definido por:

$$BW = f_2 - f_1 = 0.05844 \text{ [MHz]} \quad (4.34)$$

Por último, se define el factor de calidad del resonador 3 como sigue:

$$Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{1.51750}{0.05844} = 25.96 \quad (4.35)$$

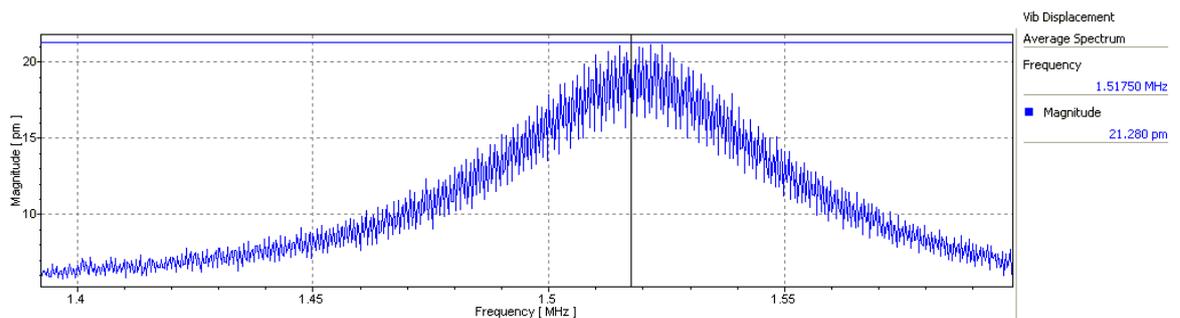


Figura 4.42. Máximo desplazamiento del Resonador 3.

Como un dato extra se obtuvo el valor del desplazamiento máximo de la viga resonante cuando esta vibra a la frecuencia de resonancia como se muestra en la figura 4.42 y es:

$$d_{m\pm v} = 21.280 \text{ [pm]} \quad (4.36)$$

Como se puede observar con los resultados mostrados en este capítulo, los dispositivos MEMS elegidos para la caracterización dinámica y estática queda completada. Las gráficas mostradas en las correspondientes ubican perfectamente a los dispositivos MEMS como sistemas de primer y segundo orden.

### 4.3 Conclusiones

Por último, para terminar con lo revisado en los cuatro capítulos mostraré de forma concreta las conclusiones a las que se han llegado con el desarrollo de este trabajo:

1. La caracterización estática y dinámica de los MEMS resulta sumamente importante, ya que representa el punto crucial entre el éxito o fracaso de cualquier diseño.
2. La caracterización estática realizada con el MSA-400 en general, resultó medianamente satisfactoria, ya que las capas metálicas reflejan el haz de luz.
3. La caracterización dinámica dentro del plano resultó bastante satisfactoria, pues es relativamente fácil encontrar las curvas características de los sistemas, siempre y cuando se revise y entienda el principio de operación del mismo.
4. El actuador electro térmico en V resultó ser un sistema más lento, aunque más eficiente con relación al desplazamiento.
5. La caracterización dinámica fuera del plano con el Vibrómetro de Micro escaneo resulta satisfactorio, pues las curvas son bastante limpias y de fácil lectura, sin embargo, es necesario un buen entendimiento del principio de operación del sistema en cuestión para evitar dañarlo.
6. Los resonadores tipo MEMS tienen relación directa con la longitud de las vigas resonantes y la frecuencia de resonancia.

7. El diseño de los resonadores de alta frecuencia caracterizados en este trabajo, para poder ser empleados en aplicaciones inalámbricas tendrían que ser mejorados, pues no alcanzan los requerimientos para RF.
8. Como trabajo sugerido a futuro, se recomienda el establecimiento de un mejor laboratorio en el que se pueda ubicar el MSA-400, ya que el hecho de no estar en una planta baja provoca que las vibraciones mecánicas del edificio sean comparables con las mediciones de la caracterización de los MEMS.
9. Las bombas de vacío y cualquier maquinaria que involucre vibraciones mecánicas deben estar aisladas y fuera del laboratorio de caracterización de MEMS, pues la mesa de aislamiento mecánico donde se monta el MSA-400 resulta insuficiente.
10. La instalación de un centro de encapsulado de MEMS es primordial para una mejor caracterización de los MEMS, debido a que los resultados de las curvas de caracterización con y sin encapsulado se ven considerablemente afectados, y en consecuencia, los resultados presentados de forma completamente profesional exigen tanto curvas de desempeño de los MEMS sin encapsulado, como curvas de desempeño de los MEMS con encapsulado.
11. Adquisición de puntas de contacto más delgadas para la correcta actuación eléctrica de los MEMS.
12. El desarrollo de electrónica de alta frecuencia para la caracterización de MEMS de alta frecuencia.

#### 4.4 Bibliografía y Referencias

1. **Jim Carter, Allen Cowen, Busbee Hardy , Ramaswamy Mahadevan, Mark Stonefield, and Steve Wilcenski.** *PolyMUMPs Design Handbook*. s.l. : MEMSCap Inc., 2005.
2. **MEMSCAP.** [http://www.memscap.com/en\\_mumps.html](http://www.memscap.com/en_mumps.html).  
[http://www.memscap.com/en\\_mumps.html](http://www.memscap.com/en_mumps.html). [Online] [Cited: Mayo 12, 2009.]
3. *Characterization of Work and Power Efficiency of Micromachined Polymer Thermal Actuators.* **Dan Sameoto, Mana Hamidi, M. Parameswaran (Ash).** 2007, IEEE.

4. **Pelesko, A. John and Berstein, H. David.** *Modeling MEMS and NEMS*. Boca Raton, Florida, USA. : Chapman and Hall/CRC, 2002. ISBN 1-58488-306-5.
5. **WIKIPEDIA.** <http://www.wikipedia.com>.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Joule](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule). [Online] Junio 7, 2009. [Cited: Junio 5, 2009.]
6. *Electrothermal Properties and Modeling of Polysilicon Microthermal Actuators.* **Aaron A. Geisberger, Member, ASME, Niladri Sarkar, Matthew Ellis, and George D. Skidmore.** 4, s.l. : IEEE, 2003, Vol. 12. 1057-7157/03.
7. **Varadan K. Vijai, Vinoy K. J, Jose K. A.** *RF MEMS and Thier Applications*. Pennsylvania State University, USA. : Wiley, 2003.
8. **Facultad de Ingeniería, UNAM.** Tesis de Licenciatura. *Diseño de un resonador en la tecnología MEMS para aplicaciones de filtrado en radio frecuencia y microondas.* 2005.
9. *Vibrating RF MEMS for next generation wireless applications.* **Nguyen, Clark T.C.** Michigan : Department of EECS, Michigan University, 2004. IEEE 2004 Custom Integrated Circuits Conference.