

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.

Material de la Capa	Espesor (μm)	Nombre del nivel de litografía
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 electro térmico 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.

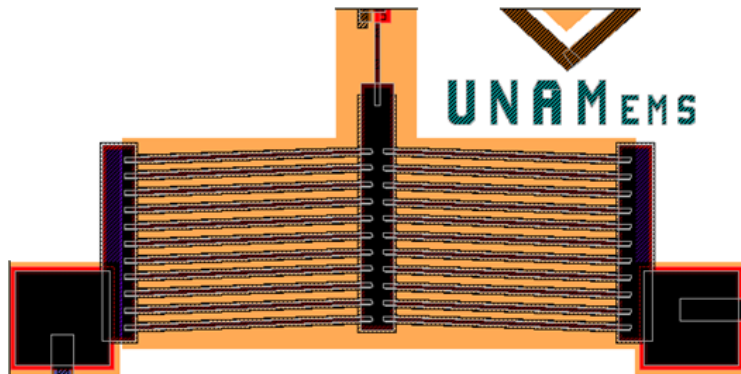


Figura 4.1. Plantilla del *chevron* en MEMSPRO.

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 μm .

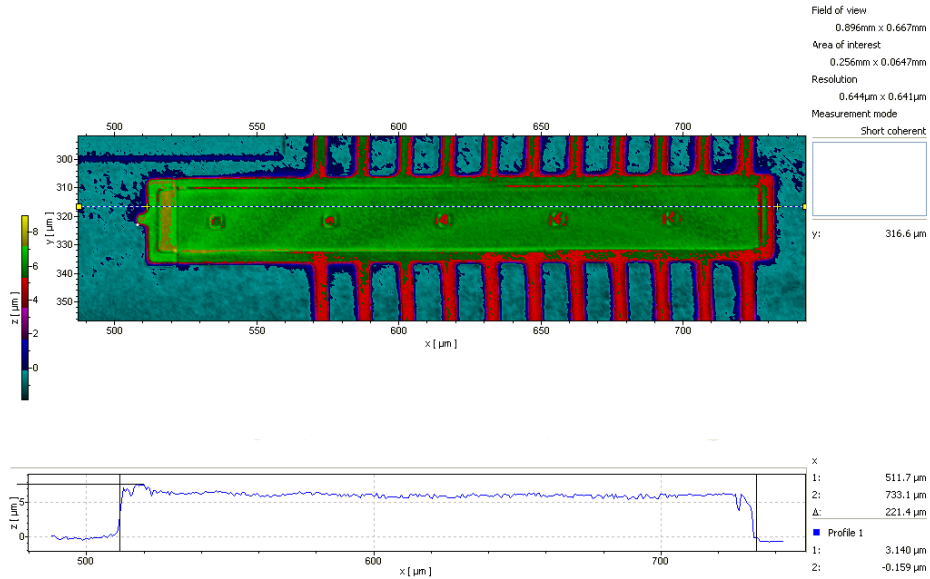


Figura 4.2. Topografía en 2D con perfil del brazo central del *chevron*.

En el mismo perfil es posible medir la longitud del brazo principal que es de 221.4 μm .

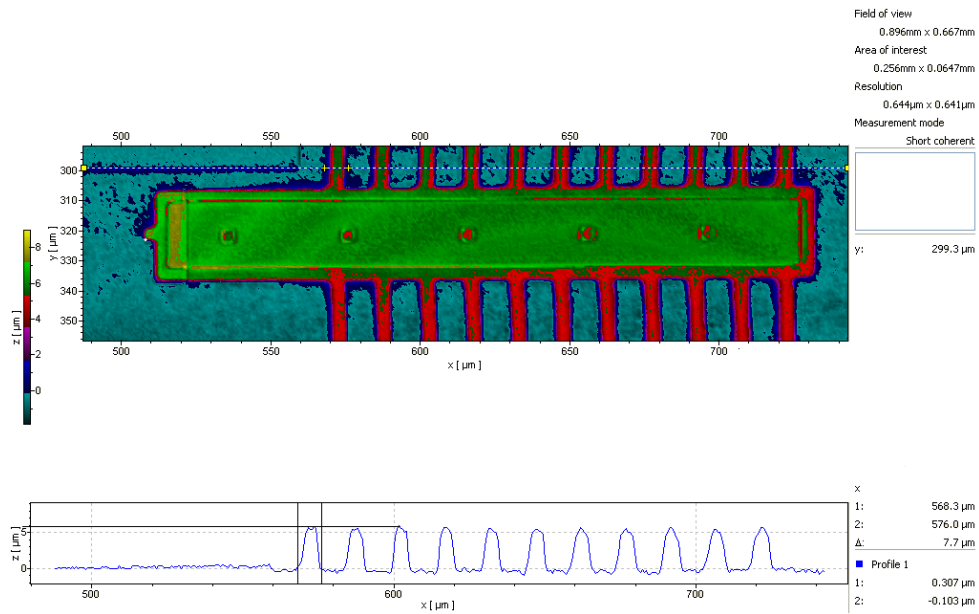


Figura 4.3. Topografía en 2D con perfil de los brazos laterales del *chevron*.

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 μ m y un espesor de 6 μ 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.

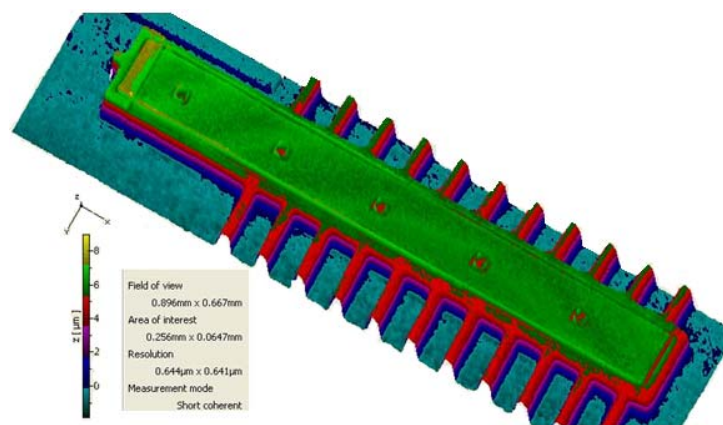


Figura 4.4. Topografía en 3D del *chevron*.

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.

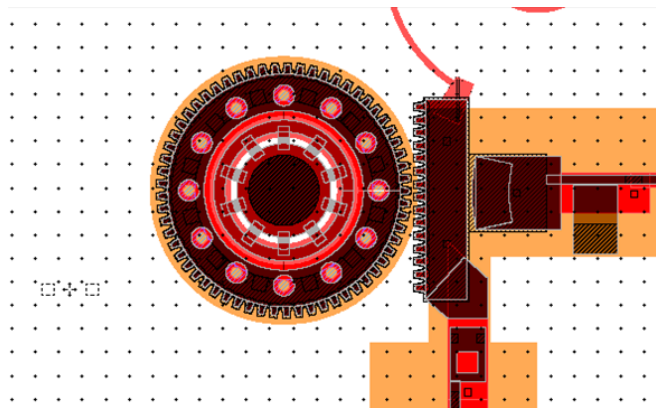


Figura 4.5. Plantilla en MEMSPRO del engrane.

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 $7.35 \mu\text{m}$.

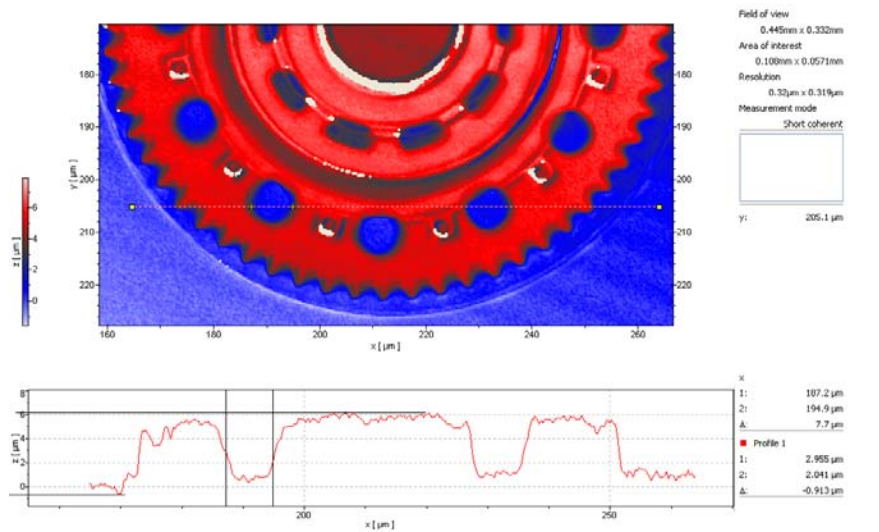


Figura 4.6. Topografía en 2D con espesor del engrane.

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 µm.

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 µm.

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.

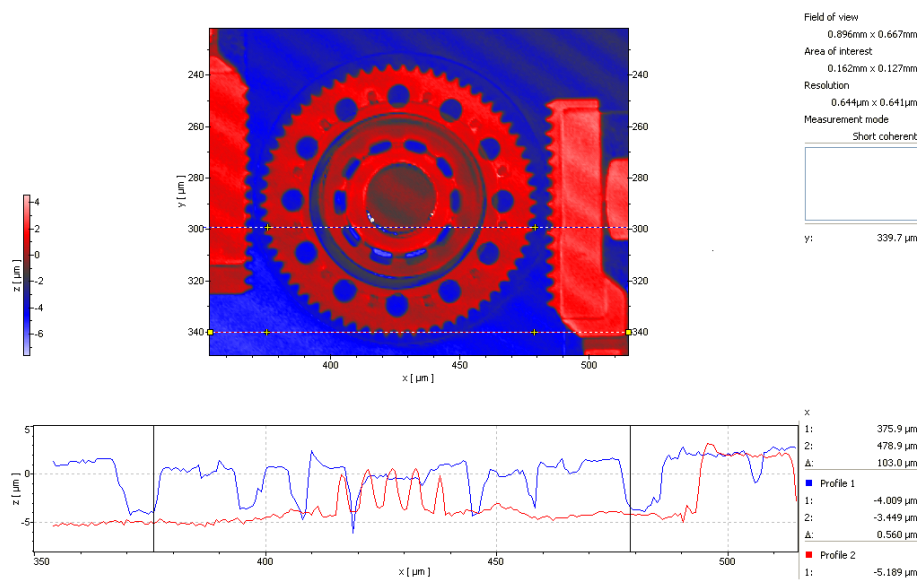


Figura 4.7. Topografía en 2D con diámetro del engrane.

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.

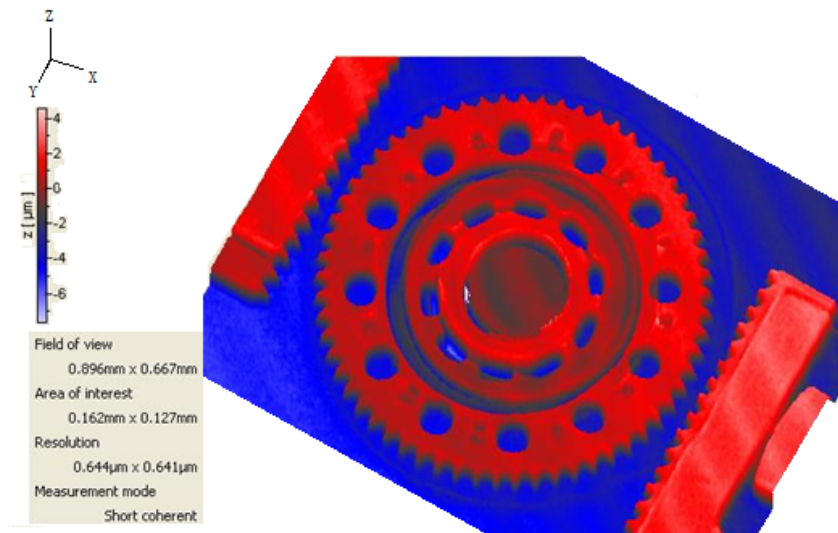


Figura 4.8. Topografía en 3D del engrane.

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.

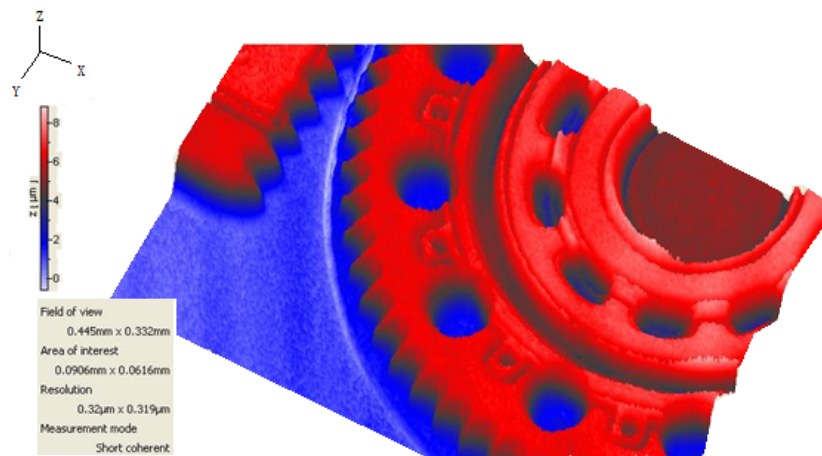


Figura 4. 9. Topografía en 3D del engrane.

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 $3 \mu\text{m}$.

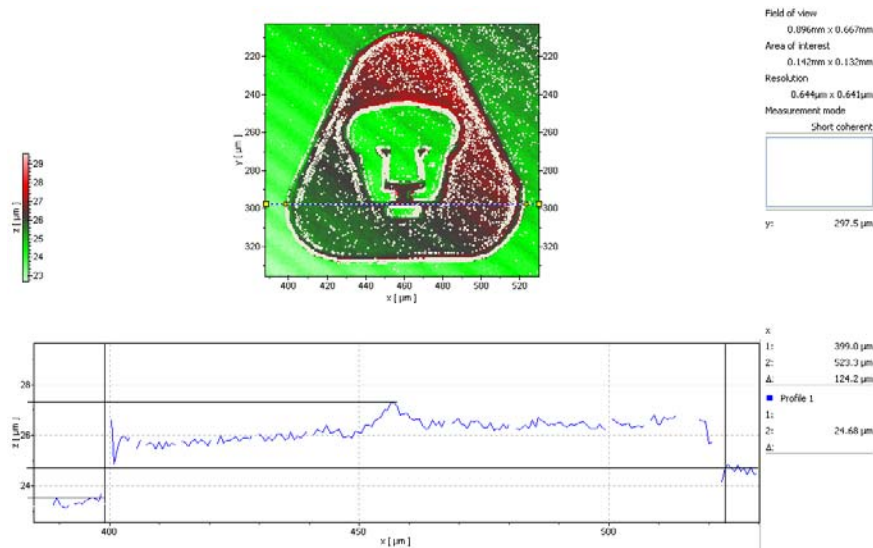


Figura 4.11. Topografía en 2D con perfil del logotipo de Pumas.

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.

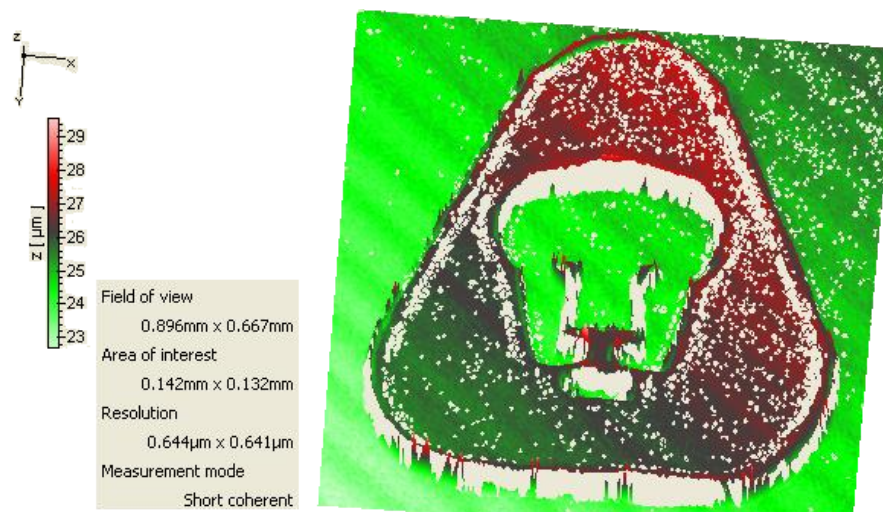


Figura 4.12. Topografía en 3D del logotipo de Pumas.

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.

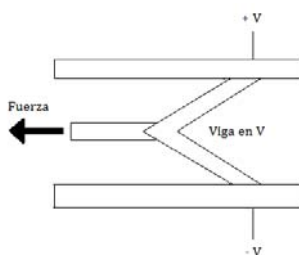


Figura 4.13. Esquema de un actuador electro térmico en V.

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

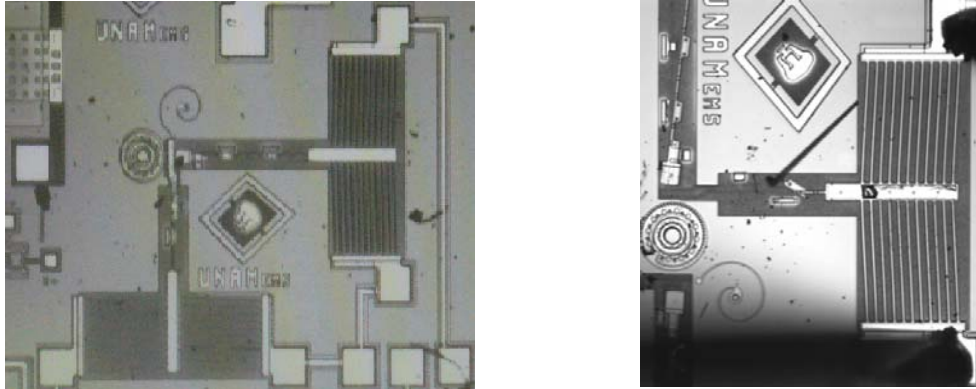


Figura 4.14. Imágenes del *chevron* electrotérmico.

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.

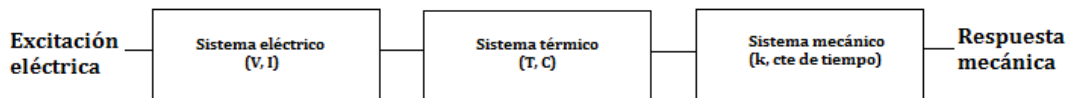


Figura 4.15. Diagrama de bloques del sistema electrotérmico.

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.

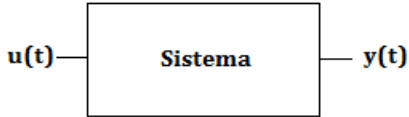


Figura 4.16. Respuesta de un sistema en presencia de una perturbación en la entrada.

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 τ la constante de tiempo a lazo abierto. Aplicando la transformada de Laplace en ambos lados de la ecuación (4.4) tenemos,

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

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

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

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

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 τ , y se pueden evaluar a partir de información a lazo abierto del sistema. La constante de tiempo a lazo abierto τ 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 τ como el tiempo en el que la respuesta del sistema alcanza el 63.21% de la respuesta final.

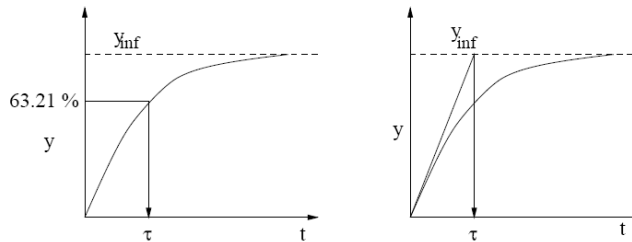


Figura 4.17. Interpretación de la constante de tiempo.

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.

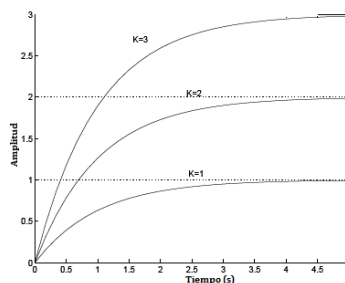


Figura 4.18. Efecto de la ganancia a lazo abierto sobre la respuesta de un sistema con $\tau=1$.

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.

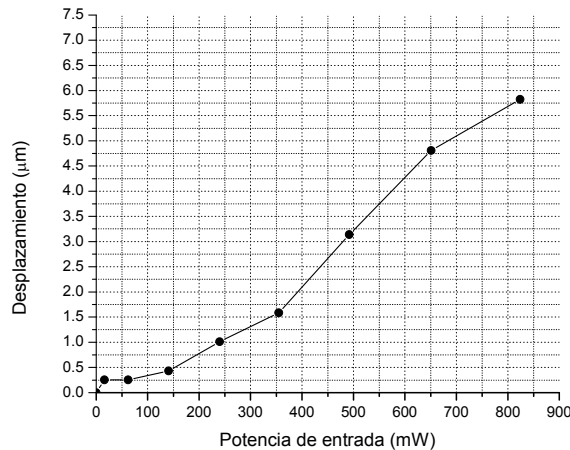


Figura 4.19. Desplazamiento vs. Potencia de entrada del *chevron*.

Como se observa en la figura 4.19 la potencia necesaria para obtener el mayor desplazamiento ($5.75 \mu\text{m}$) 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.

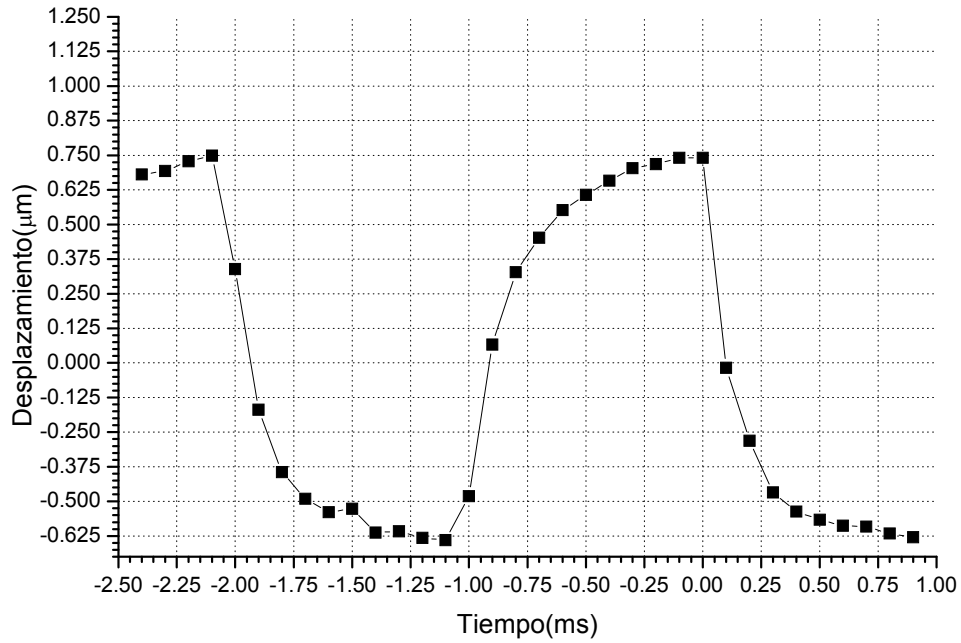


Figura 4. 20. Respuesta temporal del *chevron*.

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.

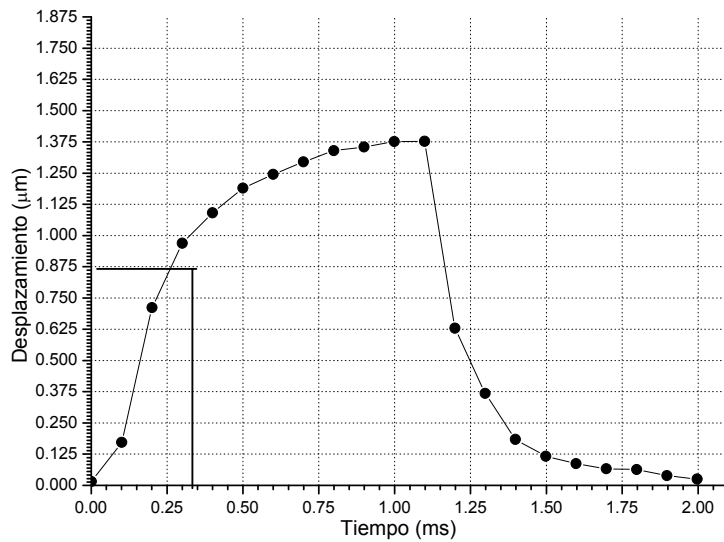


Figura 4. 21. Constante de tiempo del *chevron*.

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 electro térmico 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.

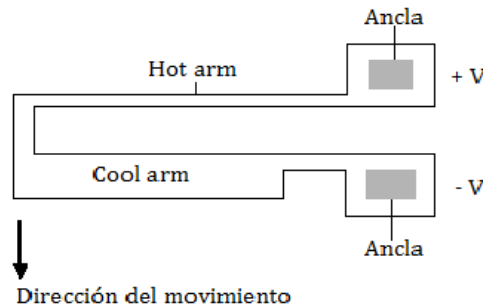


Figura 4.22. Esquema del *hot arm* simple.

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].

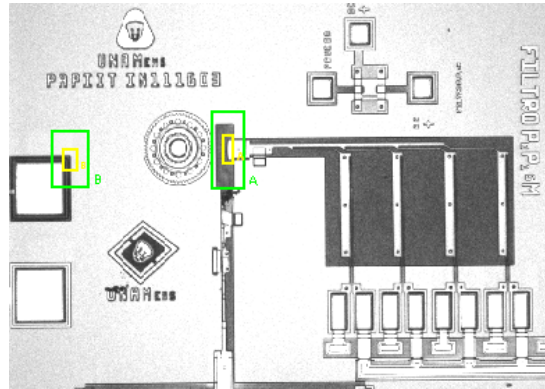


Figura 4.23. Imagen del sistema de *hot arm*.

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.

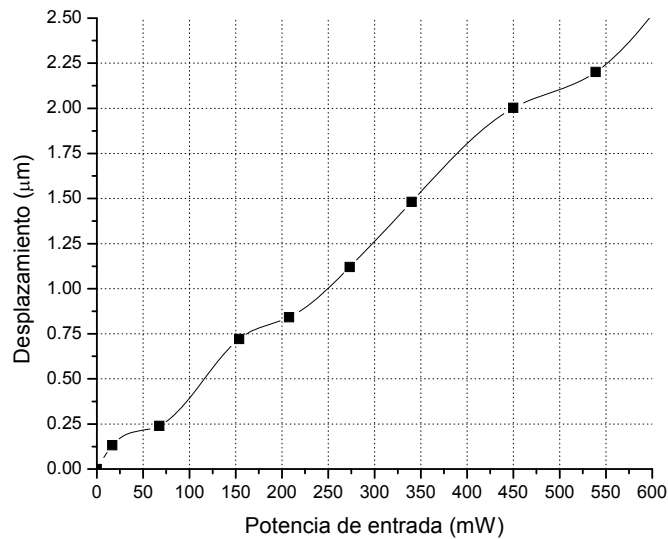


Figura. 4.24. Gráfica de Potencia de entrada vs. Desplazamiento del *hot arm*.

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 V como máximo.

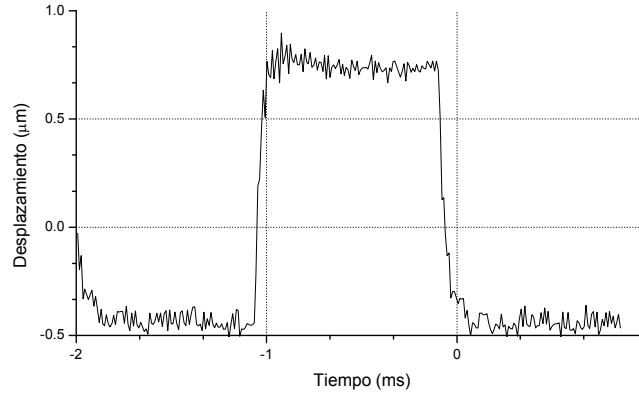


Figura 4.25. Respuesta temporal del sistema de *hot arms*.

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.

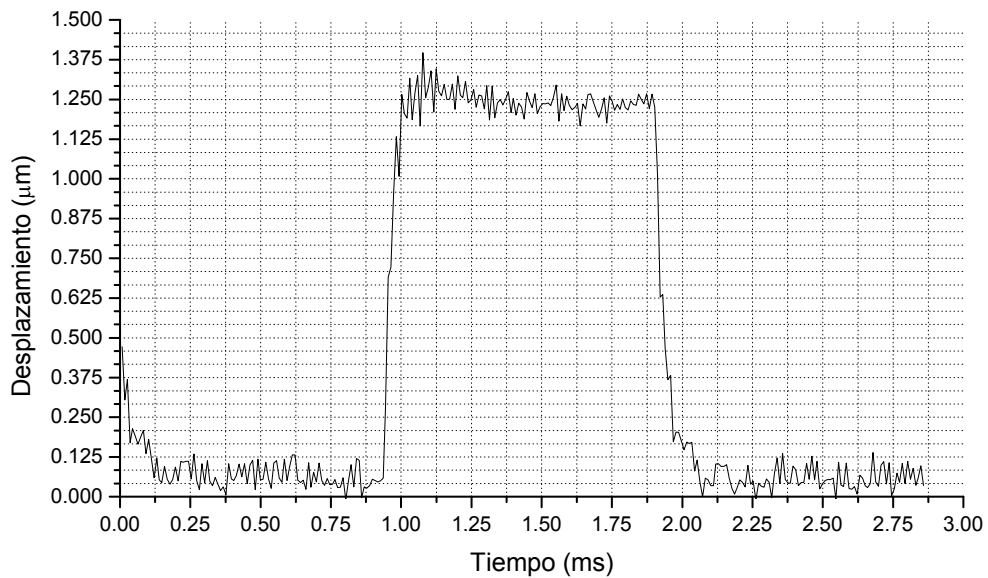


Figura 4.26. Constante de tiempo del sistema de *hot arms*.

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.

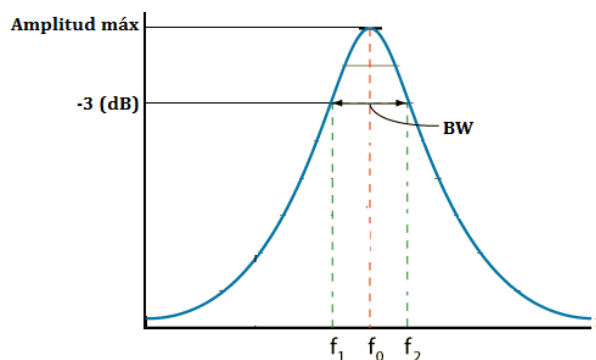


Figura 4.28. Gráfica ancho de banda de una señal.

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_r , un ancho W_r , y un espesor h , está hecha de un material con un módulo de Young E y una densidad de masa ρ . 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.

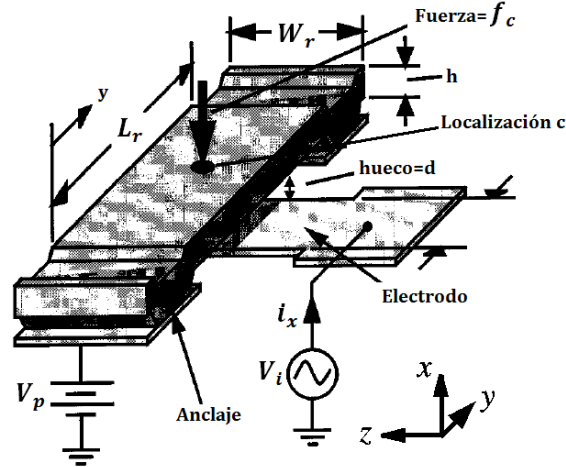


Figura 4.29. Resonador micromecánico con polarización y configuración de excitación.

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:

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

Donde ϵ_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:

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

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

$$f_{nom} = 1.03k \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{h}{L_r^2}} \quad [Hz] \quad (4.19)$$

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.

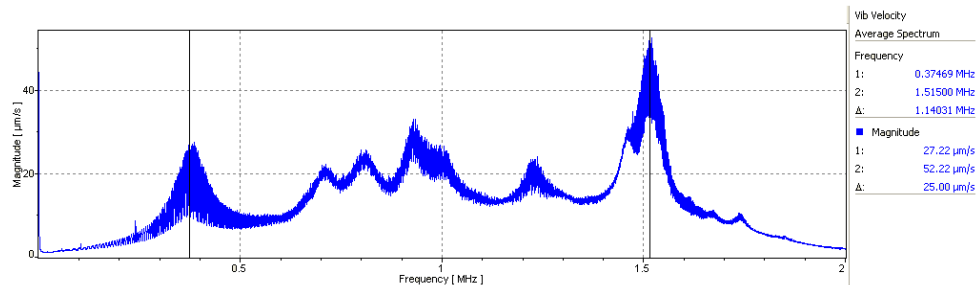


Figura 4.31. Respuesta al ruido blanco del Resonador 1.

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.

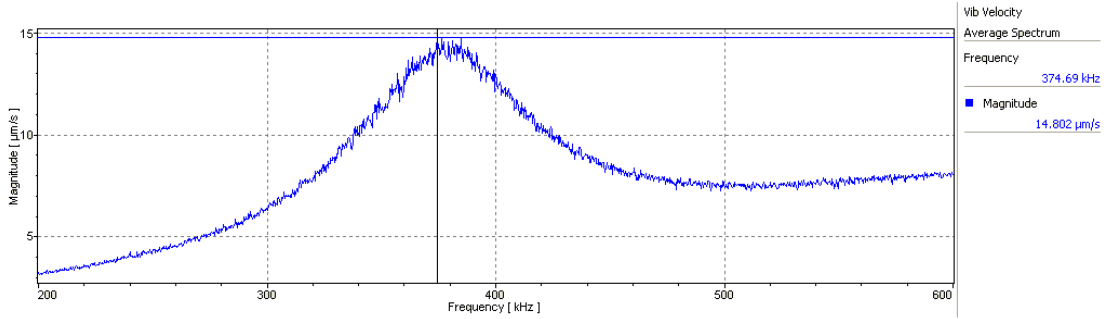


Figura 4.32. Frecuencia de Resonancia del Resonador1.

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:

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

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 :

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

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):

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

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 $\frac{1}{\sqrt{2}}$:

$$|velocidad_{m\acute{a}x}| * \frac{1}{\sqrt{2}} = \left(14.802 \left[\frac{\mu m}{s} \right] * \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 10.4664 \left[\frac{\mu m}{s} \right] \quad (4.22)$$

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.

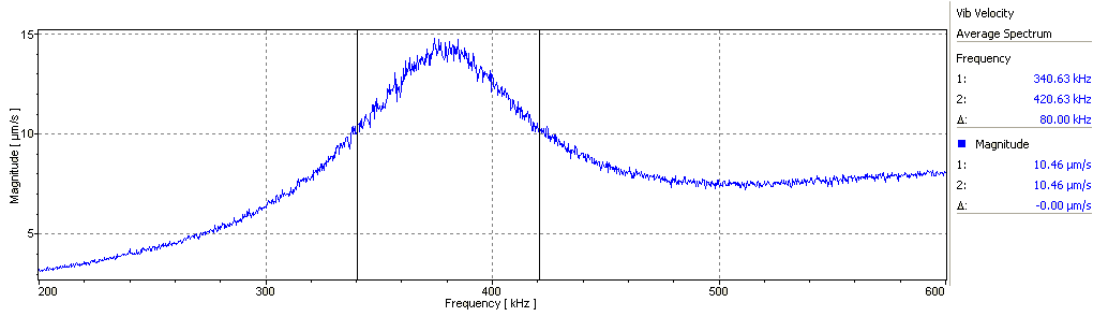


Figura 4.33. Ancho de Banda del Resonador 1.

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:

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

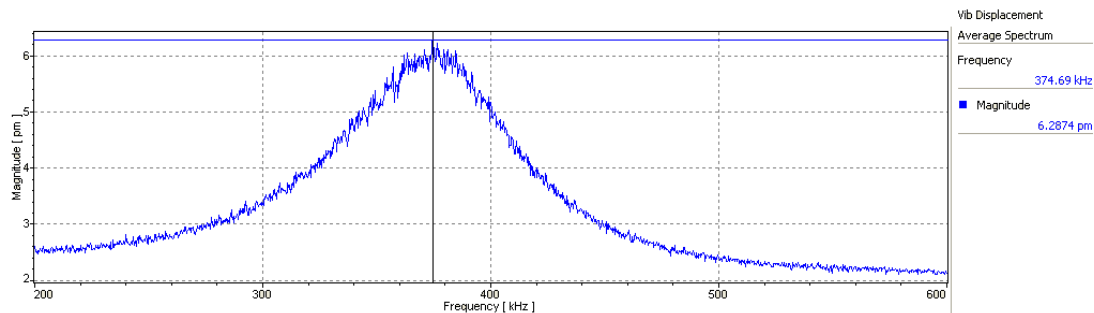


Figura 4.34. Maximo desplazamiento del Resonador 1.

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.

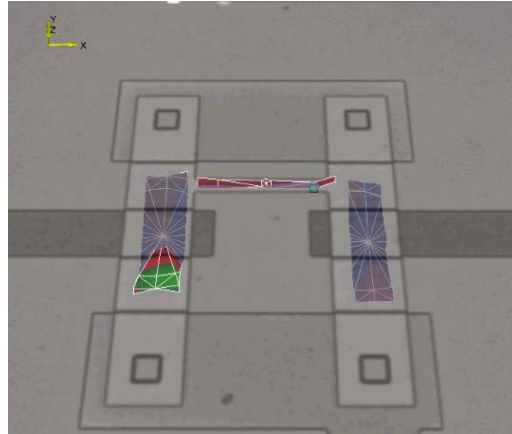


Figura 4.35. Estructura del Resonador 2.

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.

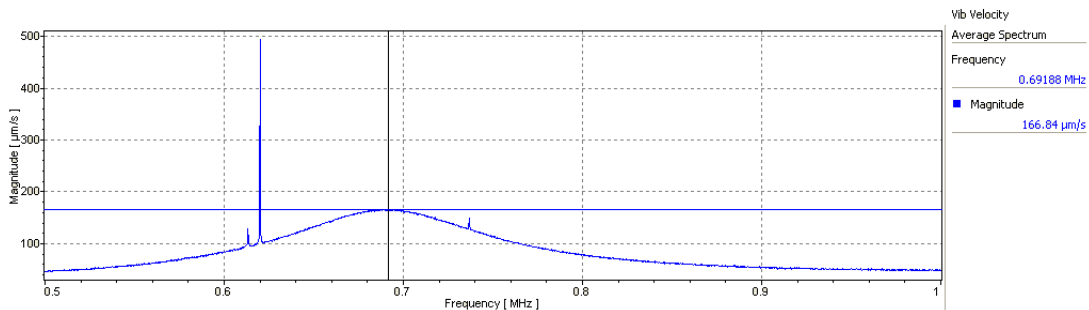


Figura 4.36. Frecuencia de Resonancia del Resonador 2.

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:

$$|velocidad_{m\acute{a}x}| * \frac{1}{\sqrt{2}} = \left(166.84 \left[\frac{\mu m}{s}\right] * \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 117.97 \left[\frac{\mu m}{s}\right] \quad (4.28)$$

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

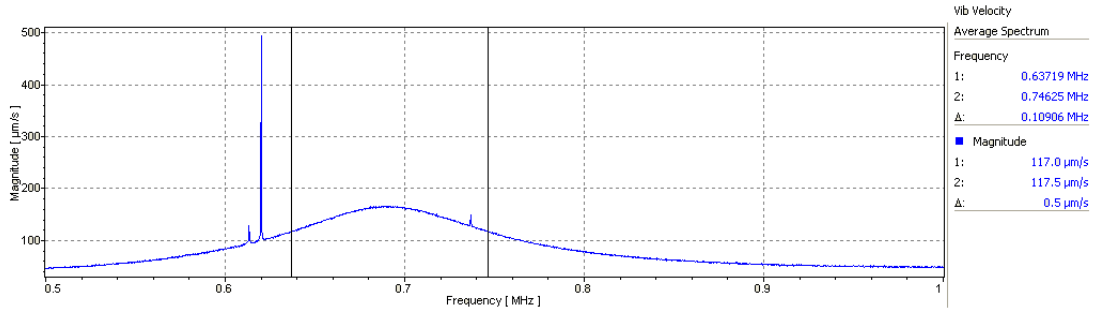


Figura 4.37. Ancho de Banda del Resonador 2.

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.

$$d_{m\acute{a}x} = 37.68 \text{ [pm]} \quad (4.31)$$

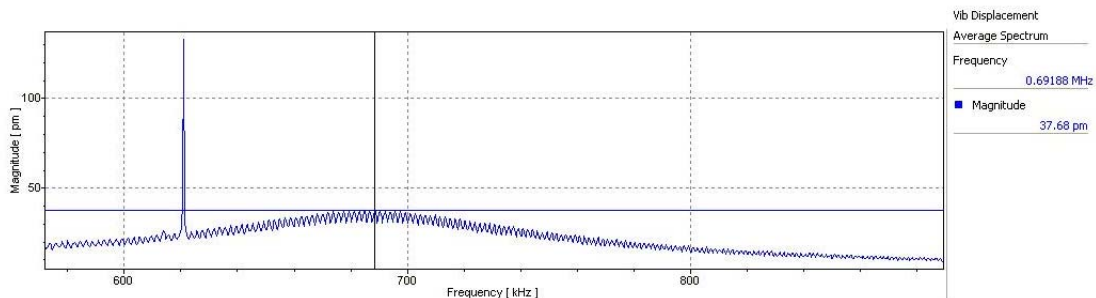


Figura 4.38. Máximo desplazamiento del Resonador 2.

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:

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

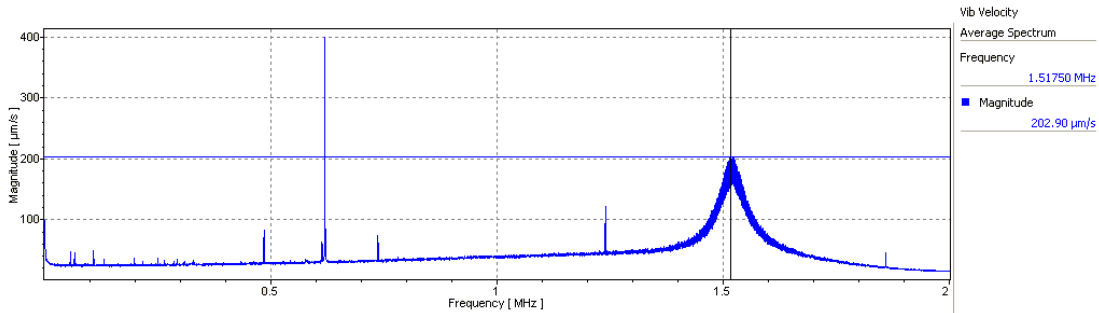


Figura 4.40. Frecuencia de Resonancia del Resonador 3.

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:

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

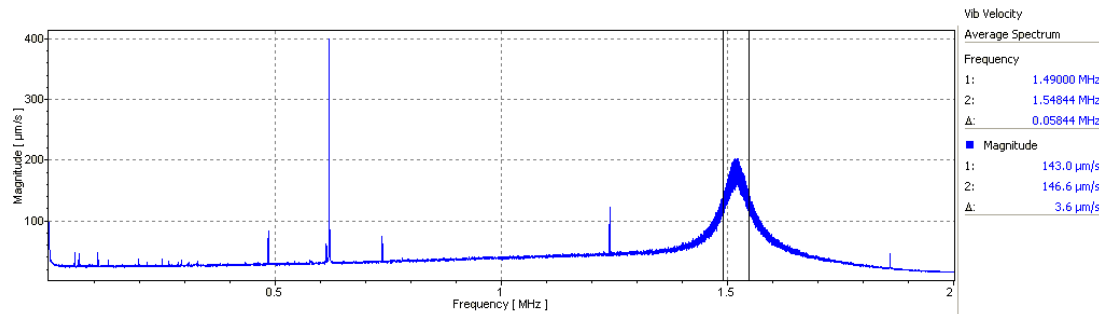


Figura 4.41. Ancho de Banda del Resonador 3.

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

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

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

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

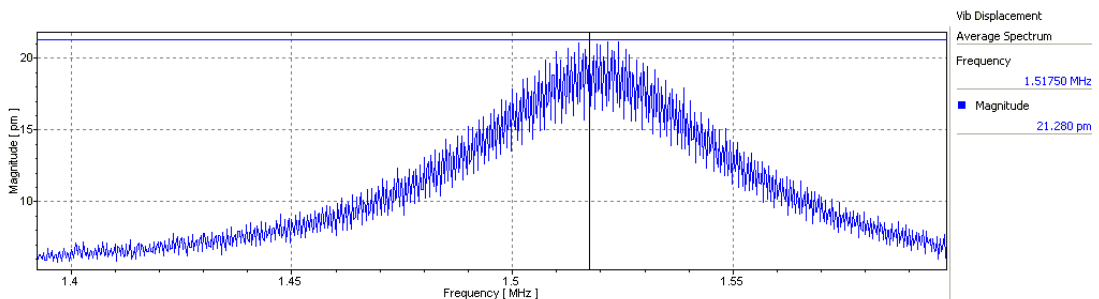


Figura 4.42. Máximo desplazamiento del Resonador 3.

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:

$$d_{m\acute{a}x} = 21.280 [pm] \quad (4.36)$$

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. [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. [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.