

# Fatiga en sistemas micro-electro mecánicos (MEMS) capacitivos

Hugo López Montenegro  
Lab. Materiales  
UNMDP  
hmonteleoarn@fi.mdp.edu.ar

Leonardo Arnone  
Lab. Componentes  
UNMDP  
leoarn@fi.mdp.edu.ar

Miguel Rabini  
Lab. Componentes  
UNMDP  
mrabini@fi.mdp.edu.ar

**Resumen**—Los sistemas micro-electro mecánicos (MEMS) han sido investigados y aplicados en varias áreas de aplicación tecnológica. Hoy en día la producción de (MEMS) constituye una de las ramas de la industria de más rápido crecimiento.

Las aplicaciones de los MEMS en telecomunicaciones e instrumentación han atraído la atención en los últimos años principalmente por utilizar los procesos ya conocidos de fabricación de semiconductores. Un microsistema usual, capaz de actuar como sensor capacitivo, es el llamado ‘comb-drive’.

El campo de aplicación de estos dispositivos se está incrementando continuamente. Ya son parte esencial en sistemas críticos de seguridad, como por ejemplo, la industria automotriz o la aeronáutica, por tanto, estudiar la vida útil de los MEMS es de gran interés.

En este trabajo se detalla una técnica posible que puede ser utilizada para medir el avance de la fatiga en un MEMS capacitivo tipo ‘comb drive’.

**Index Terms**—MEMS, fatiga, fractura mecánica, comb drive.

## I. INTRODUCCIÓN

La utilización de sistemas micro-electro mecánicos (MEMS) en dispositivos electrónicos ha ido creciendo rápidamente en los últimos años. Existe la posibilidad de realizar capacitores variables, micro interruptores, inductores, filtros, sensores, atenuadores, máquinas lineales y rotativas. Han despertado el interés de los profesionales de la ingeniería principalmente para su utilización en telecomunicaciones, bio-ingeniería, mecánica e instrumentación [1] especialmente por utilizar los procesos de fabricación de los semiconductores ya conocidos [2].

Para diseñar estos dispositivos se constituyen grupos de trabajo multidisciplinares. Conocimiento en Ingeniería de los Materiales, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica son fuertemente requeridos en las diversas etapas que involucran su diseño, fabricación y utilización final.

En la actualidad los vehículos incorporan microsensores de presión en el sistema de control electrónico del motor y acelerómetros en el airbag, algunas estimaciones apuntan a que en un futuro no muy lejano los sensores y la electrónica represente un 30% del valor del automóvil [3].

Nuevas aplicaciones potenciales en materia de gestión del motor, control de la calidad del aire y de los gases de escape, cajas de cambio, ABS, control de la dinámica del vehículo

y antideslizante, control de navegación adaptativo (ACC), airbag, detección de obstáculos, mejoras en la visibilidad, etc.

La inclusión de un computador en los vehículos, que permite ajustes automáticos de la radio, climatización, entretenimiento de los ocupantes etc., son otras áreas donde están presentes los MEMS.

El MEMS llamado ‘comb-drive’ es un dispositivo muy versátil que puede ser aplicado a sensores, atenuadores, filtros y moduladores [1] [4] [5]. El comb-drive toma su nombre por su similitud estructural con un par de peines enfrentados con sus dientes o dedos intercalados. Uno de los peines es fijo, y el otro móvil. Al aplicar una diferencia de potencial a los peines, el campo eléctrico produce el desplazamiento de la parte móvil.

En las aplicaciones donde los comb-drives operan como filtros, su estructura es modelada como un sistema mecánico de tipo masa-resorte-amortiguador. Utilizando comb-drives de geometrías variadas se pueden lograr filtros pasa bajos, pasa altos y pasa bandas.

Una de las ventajas de utilizar micro-mecanismos como filtros es la alta selectividad lograda. Esta característica es debido a las bajas pérdidas del sistema. Como resultado se pueden realizar dispositivos de comunicaciones más selectivos y así poder agrupar más canales de radio frecuencia (RF) en una misma banda [1].

Como el espectro de ondas electromagnético utilizado es limitado, la utilización de micro-mecanismos es una forma de aumentar la capacidad del canal dentro de la banda existente. Actualmente se están desarrollando varias estructuras de micro-mecanismos para ser utilizados en sistemas de radio comunicaciones [4] [5] [6] [7] [8].

## II. LIMITACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS MEMS

Los dispositivos MEMS son estructuras que no están debidamente caracterizadas en término de confiabilidad [9]. Muchos MEMS son diseñados para que tengan un largo tiempo de operación, aprovechando su fortaleza intrínseca y estabilidad. No obstante, el pequeño tamaño de estos dispositivos los hace sensible a las condiciones de operación.

Naturalmente los fabricantes de MEMS tratan de optimizar su performance, como consecuencia de ello, en muchos casos,

estos dispositivos se encuentran trabajando mecánicamente al límite de su resistencia a la fatiga. Se hace por lo tanto fundamental definir los límites operativos para que sean diseñados y aplicados inteligentemente. Por este motivo es de suma importancia caracterizar como se inicia una fisura y su posterior propagación.

No se puede aplicar directamente a los MEMS los conocimientos de los procesos de falla por fatiga a escala macroscópica; las pruebas de falla por fatiga deben ser hechas sobre los MEMS. Por tanto es muy importante la observación del crecimiento de una fisura y su dependencia temporal. Ciertos efectos de micro-estructura, ambiente y proceso de fabricación pueden ser muy significantes a nivel de micro-escala, aunque sean irrelevantes en macro-escala.

### III. MÉTODO PARA MEDIR EL AVANCE DE UNA FISURA EN UN COMB-DRIVE CAPACITIVO

Los sensores y actuadores capacitivos son ampliamente usados en dispositivos MEMS. Un comb-drive es un actuador capacitivo que es operado por la fuerza electrostática. La capacidad del comb-drive es función de la forma y dimensión de sus electrodos.

Una posible forma de medir el incremento de una fisura, es midiendo la variación del desplazamiento de los dedos del comb-drive cuando se aplica la misma tensión de alimentación.

Una posibilidad de medir el desplazamiento es monitoreando los pequeños cambio de capacidad que ocurren entre los dedos del comb-drive. El problema que se presenta es que esta variación de capacidad es enmascarada por la gran capacidad parásita presente.

Una forma de medir estas capacidades es enviando una señal de relativa alta frecuencia a través de la capacidad formada por los dedos del comb-drive y medir su variación de impedancia. El problema con esta medición es que el cable coaxial que se conecta al MEMS para efectuar la medición posee una capacidad parásita del orden de los  $100 \text{ pF/m}$ . Además esta capacidad parásita no es constante y varía con la temperatura.

El método que se describe permite medir pequeñas variaciones de capacidad en presencia de grandes capacidades parásitas [2].

#### III-A. Medición de la capacidad de un comb-drive

La estructura de un comb-drive consiste en una estructura fija y otra móvil, ambas en forma de dedos para lograr una mayor capacitancia, como se ve en la Fig. 1. Al producirse el desplazamiento de la estructura móvil varía la capacidad del comb-drive, como indica la Ec. 1 [10] [11]:

$$C = 2n \frac{\epsilon(L - y)e}{g} \quad (1)$$

donde  $L$  es la altura del dedo del comb-drive,  $y$  es el desplazamiento,  $g$  es la separación entre los dedos superiores e inferiores y  $e$  es el espesor del dedo;  $\epsilon$  es la constante dieléctrica,  $n$  es el número de dedos.

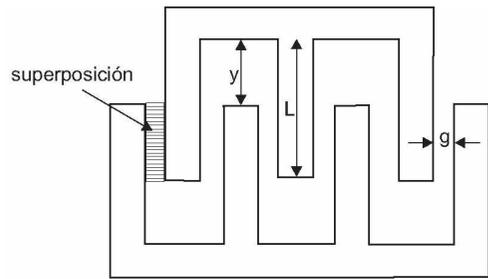


Figura 1. Parámetros para medir capacidad en un comb-drive

#### III-B. Estructura utilizada

En la Fig. 2 se ve la estructura del comb-drive utilizada en el ensayo. En uno de los brazos se genera una fisura mediante una muesca en forma de cuña, como se indica en la Fig. 3. El grado de avance de la misma se evalúa en función de la variación del desplazamiento total del comb-drive.

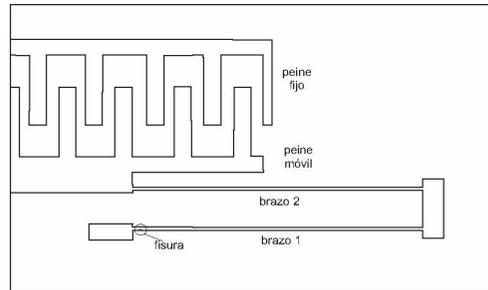


Figura 2. Estructura del Comb-drive simulado

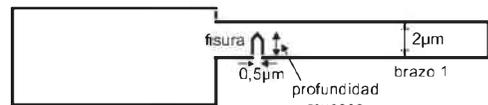


Figura 3. Fisura inducida

En esta estructura el ancho de los brazos es de  $2 \mu\text{m}$  y se generaron cinco fisuras mediante muescas (Fig. 3), con  $0,5 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$ ,  $1,25 \mu\text{m}$ ,  $1,5 \mu\text{m}$  y  $1,75 \mu\text{m}$  de profundidades respectivamente.

Para simular las diferentes fisuras se utilizó el programa Comsol Multiphysics 3.5a. La Fig. 4 muestra la variación del desplazamiento del comb-drive en función de la tensión aplicada y la Fig. 5 la variación de su capacidad. Como se puede observar en la Fig. 4 para una muesca de  $1,75 \mu\text{m}$  de profundidad, la máxima tensión que se le puede aplicar es de  $550 \text{ V}$

#### IV. CIRCUITO UTILIZADO EN EL ENSAYO

El circuito a utilizar en la medición se muestra en la Fig. 6, donde:

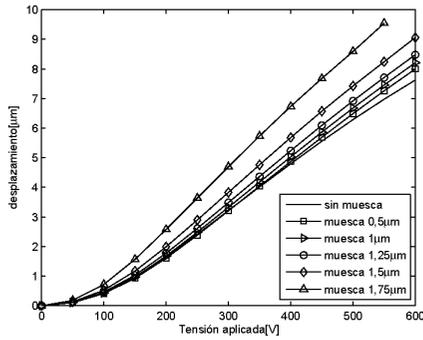


Figura 4. Desplazamiento del comb-drive en función de la tensión aplicada

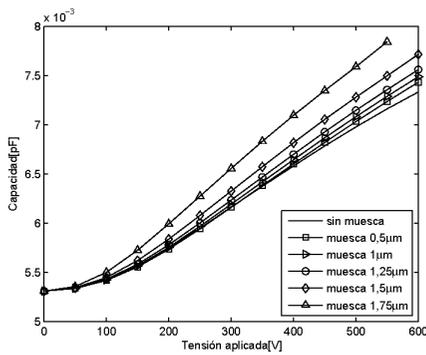


Figura 5. Capacidad del comb-drive en función de la tensión aplicada

- $V_{RF}$  es un generador de radio frecuencia de 100MHZ.

- $V_{comb-drive}$  es la tensión que se aplica al actuador para producir el movimiento de sus dedos, esta tensión se aplica a través del inductor  $L_3$  que funciona como un choque de radio frecuencia.

- $C_{comb-drive}$  es la capacidad del comb-drive y es proporcional a la separación de sus dedos, como lo indica la Ec. (1).

- $C_{cable}$  es la capacidad parásita de los cables de conexión, su valor es alrededor de 170pF. Debido a que el valor de  $C_{cable}$  es de varios órdenes de magnitud mayor que la capacidad del actuador  $C_{comb-drive}$ , una forma de evitar su influencia es formar un circuito tanque paralelo introduciendo el inductor  $L_1$  y la capacidad auxiliar  $C_1$  de forma tal que el circuito tanque esté en resonancia a la frecuencia de la fuente  $V_{RF}$ :

$$f_{RF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_1 + C_{cable})}} \quad (2)$$

Un circuito tanque similar se emplea para contrarrestar la capacidad parásita de las puntas de prueba que se aplican sobre la resistencia  $R_1$  cuando se mide la señal modulada.

Si ahora en el circuito utilizado (Fig. 6), se eliminan los elementos que están en resonancia (Fig. 7), a la salida del

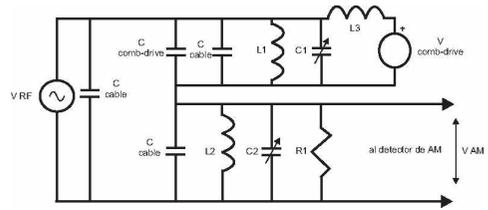


Figura 6. Circuito utilizado para medir la capacidad del comb-drive

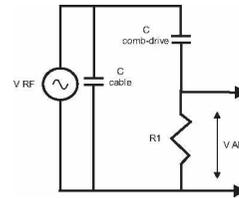


Figura 7. Circuito simplificado

modulador se tiene:

$$\frac{V_{AM}}{V_{RF}} = \frac{R_1}{R_1 - j\frac{1}{\omega_{RF}C_{comb-drive}}} \quad (3)$$

como  $C_{comb-drive}$  es muy pequeña, se puede expresar:

$$\frac{V_{AM}}{V_{RF}} \approx j\omega_{RF}R_1C_{comb-drive} \quad (4)$$

entonces:

$$\left| \frac{V_{AM}}{V_{RF}} \right| \approx \omega_{RF}R_1C_{comb-drive} \quad (5)$$

En el plano temporal:

$$V_{AM}(t) = V_{RF}(t) \omega_{RF}R_1C_{comb-drive}(t) \quad (6)$$

de la Ec. (6) se ve que  $V_{AM}(t)$  varía linealmente en función de  $C_{comb-drive}(t)$  con:

$$C_{comb-drive}(t) = \hat{C}_{comb-drive} \text{sen}(\omega_{mt}) \quad (7)$$

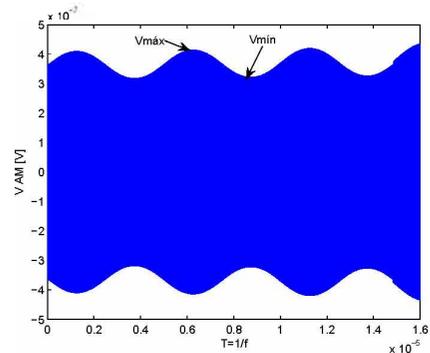


Figura 8. Señal de AM ( $V_{AM}$ ) obtenida a la salida

Tabla I  
CAPACIDAD DEL COMB-DRIVE ( $C_{comb-drive}$ ) EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE MODULACIÓN

C[fF]	m	C[fF]	m
5,3	0,1236	6,6	0,1441
5,4	0,1256	6,7	0,1453
5,5	0,1275	6,8	0,1462
5,6	0,1292	6,9	0,1476
5,7	0,1309	7,0	0,1488
5,8	0,1323	7,1	0,1500
5,9	0,1339	7,2	0,1512
6,0	0,1353	7,3	0,1521
6,1	0,1371	7,4	0,1531
6,2	0,1386	7,5	0,1540
6,3	0,1396	7,6	0,1551
6,4	0,1409	7,7	0,1559
6,5	0,1428	7,8	0,1569

Por tanto, este esquema produce una señal de amplitud modulada ( $AM$ ), cuya variación de amplitud es proporcional a la variación de capacidad del comb-drive y por lo tanto proporcional a la variación de separación de los dedos del actuador.

En la Fig. 8 se observa la salida obtenida cuando  $V_{comb-drive}$  es una señal de baja frecuencia, donde el índice de de modulación  $m$  [12] está dado por la expresión:

$$m = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} \quad (8)$$

de la Ec. (8) se observa que el índice de modulación  $m$  es proporcional a las variaciones de capacidad del comb-drive y por tanto a las variaciones en su desplazamiento. En la Tabla I muestran los índices de modulación  $m$  para diferentes capacidades del comb-drive.

Por lo expuesto, midiendo periódicamente el índice de modulación  $m$  en un MEMS comb-drive se puede obtener las variaciones de capacidad que se producen a medida que aumenta la fisura.

### V. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un método que permite determinar en forma práctica y precisa el inicio de una fisura y su

posterior propagación midiendo las pequeñas variaciones de capacidad que se tienen en los dedos del comb-drive.

### REFERENCIAS

- [1] D. L. R. Vidor, P. C. Godoy and I. Iturrioz, "Amplificadores y moduladores utilizando micromecanismos." *Asociación Argentina de Mecánica Computacional.*, vol. XXV, pp 707-714 (2006).
- [2] W. M. van Spengen and T. H. Oosterkamp, "A sensitive electronic capacitance measurement system to measure comb-drive motion of surface micromachined MEMS devices." *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.17 pp 828 (2007).
- [3] M. J. López Fernández, "Introducción a los sistemas microelectromecánicos MEMS" *XXIII Seminario de Ingeniería Hospitalaria, Sevilla, España.* (2005).
- [4] J. Wang, Z. Ren and C. T. Nguyen, "Self-aligned 1.14 GHz vibrating radial-mode disk resonator." *Dig. of Tech. Papers, the 12th Int. Conf. on Solid-State Sensor & Actuator (Transducers'03)*, vol. 1, pp 947-950 (2003).
- [5] J. Wang, J. E. Butler, T. Feygelson and C. T. Nguyen, "1.51 GHz poly-diamond micromechanical disk resonator with impedance-micronatched isolating support." *Proceedings, 17th Int. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conf., Maastricht, The Netherland*, vol. 1, pp 641-644 (2004).
- [6] J. R. Clark, A. C. Wong and C. T. Nguyen, "Parallel-resonator IIF Micromechanical Bandpass Filters." *Digest of Technical Papers, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, Illinois*, vol. 1, pp 1161-1164 (1997).
- [7] K. Wang, A. C. Wong, W. T. Hsu and C. T. Nguyen, "Frequency-trimming and Q-factor enhancement of micromechanical resonators via localized filament annealing." *Digest of Technical Papers, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, Illinois*, vol. 1, pp 109-112 (1997).
- [8] D. Joachim and L. Lin, "Characterization of selective Polysilicon deposition for MEMs resonator tuning." *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, pp 193-200 (2003).
- [9] S. B. Brown, W. Van Arsdell and C. L. Muhlstein, "Materials reliability in MEMs devices." *1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, Illinois.*, vol. 1, pp 16-19 (1997).
- [10] D.B. Sco and R. Shandas, "Design and simulation of a MEMS-Based Comb-drive Pressure Snsor for Pediatric Post-Operative Monitoring Applications." *Summer Bioengineering Conference, Sonesta Beach Resort in Key Biscayne, Florida*, vol. 1, pp 1239-1240 (2003).
- [11] G. Somlay, Z. Szucs, A. Poppe and M. Rencz, "Simulation of a comb drive for fracture lifetime measurements" *Proceeding of the COMSOL Users Conference, Grenoble.* vol. 1, pp 1-5 (2007).
- [12] A. P. Malvino, "Principios de electrónica" *Ed McGraw-Hill, españa.* pp 1003-1006 (1993).