

Diseño y fabricación de micromotores accionados por energía térmica extraída del medio circundante

M.C. Jorge Varona Salazar¹, Dra. Margarita Tecpoyotl Torres¹,
Dr. Jesús Escobedo Alatorre¹, Dr. Anas Hamoui²

RESUMEN

Este artículo presenta el análisis y diseño de microactuadores térmicos implementados en tecnología estándar de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS). Típicamente, este tipo de actuadores son accionados generando calor por el efecto *Joule* al formar un circuito eléctrico a través de su estructura física. Sin embargo, este procedimiento requiere corrientes relativamente altas con el correspondiente consumo de potencia. Como una alternativa a los microactuadores térmicos accionados eléctricamente, este trabajo explora la posibilidad de desarrollar microactuadores que puedan operar usando una fuente de calor externa y, por ejemplo, aprovechar el calor del ambiente circundante. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de desarrollar microactuadores térmicos basados en tecnología MEMS capaces de extraer energía de una fuente de calor externa y operar de manera autónoma.

ABSTRACT

This paper presents the thermal analysis and design of microactuators based on standard MEMS

Palabras clave: MEMS, microsistemas, actuadores térmicos, energía, calor, autonomía.

Key words: MEMS, microsystems, thermal actuators, energy, heat, autonomy.

Recibido: 24 de marzo de 2008, aceptado: 6 de junio de 2008

¹ Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, tel. y fax (777) 3297000, correo electrónico: varona@iee.org.

² McGill University, Department of Electrical and Computer Engineering.

technology. The typical approach for driving this kind of actuators is by applying an electric current that flows through the device and generates Joule heating. However, this requires relatively large currents and the corresponding power consumption. As an alternative to electrically driven thermal actuators, this work explores the possibility of developing thermal actuators that can be activated with an external heat source and, for example, scavenge heat from the surrounding medium. Experimental results demonstrate the viability of exploiting thermal energy from the environment to power MEMS microactuators.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas micro-electro-mecánicos conocidos como MEMS por sus siglas en inglés, son dispositivos microscópicos en forma de actuadores o sensores que pueden ser acoplados fácilmente con un circuito electrónico y formar un sistema completo a escala micrométrica. Estos sistemas son una realidad tecnológica que encuentra multitud de aplicaciones prácticas en la vida diaria. Por ejemplo, los acelerómetros que detectan cuándo debe abrirse la bolsa de aire de un automóvil se basan en un micromecanismo o MEMS acoplado a un circuito integrado, este sistema se encuentra en millones de unidades en automóviles de todo el mundo (Analog Devices, 2008). Otro ejemplo, son los proyectores electrónicos que basan su operación en la acción de cientos de miles de microespejos que se alinean o no para reflejar un punto de luz en la imagen, estos microespejos son movidos a su vez por un micromotor en tecnología MEMS (Texas Instruments Inc., 2008). El presente trabajo se concentra en el estudio de microactuadores térmicos como fuente de fuerza motriz para todo tipo de mecanismos

con aplicaciones en campos como la medicina, sensores bioquímicos, industria aeroespacial, microrobótica, etc. Particularmente, se plantea la posibilidad de usar una fuente de calor externa que permita operar de manera "autónoma", es decir, sin depender de una batería o fuente de energía específica. La idea es aprovechar el calor existente en el ambiente circundante y hacer uso eficiente de la energía disponible para activar micromecanismos sin baterías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tradicionalmente, los actuadores térmicos requieren de un flujo de corriente eléctrica para elevar la temperatura del dispositivo a través del efecto Joule, y así producir la expansión térmica del material estructural. Independientemente de la forma en que se aplique el calor, el comportamiento térmico de estos microsistemas está definido por la ecuación de difusión de calor (1):

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

donde T es la distribución térmica, α representa la difusividad térmica, k es la conductividad térmica del material, ρ es la densidad, c es el calor específico, y \dot{q} considera la emisión volumétrica de calor.

La ecuación de difusión de calor dada en (1) puede tratarse de manera unidimensional si se considera que el largo de los micromecanismos en cuestión es muy grande en comparación con el tamaño de su sección transversal (Huang y Lee, 1999). Asimismo, ya que el dispositivo es calentado mediante una fuente de calor externa, no existe generación de calor en el elemento y la ecuación (1) se reduce a una ecuación diferencial ordinaria. Considerando que el calor es transmitido principalmente por conducción a través del elemento y por convección hacia el ambiente, y que el efecto de la radiación es despreciable (Huang y Lee, 1999; Yan *et al.*, 2004), el análisis térmico en estado estable puede desarrollarse examinando un elemento diferencial de un actuador MEMS con ancho w , espesor t , y longitud Δx . De acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica se tiene que:

$$-kwt \left. \frac{dT}{dx} \right|_x = -kwt \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x+\Delta x} + hw(T - T_a)\Delta x \quad (2)$$

donde k es la conductividad térmica del material, T es la temperatura de operación, T_a es la temperatura ambiente, y h es el coeficiente de convección hacia el ambiente.

Si se toma que $\theta = T - T_a$, una la solución particular de la ecuación (2) para condiciones de frontera $\theta_{(0)} = \theta_2$ y $\theta_{(L)} = 0$ es:

$$T_{(x)} = T_s + C_1 e^{Bx} + C_2 e^{-Bx} \quad (3)$$

donde $B = \sqrt{\frac{h}{kt}}$, $C_1 = \frac{\theta_2}{1 - e^{2BL}}$, y $C_2 = \theta_2 - C_1$.

La expansión térmica del dispositivo, ΔL , está definida de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta L = K^{-1} F_{termico}, \quad F_{termico} = A\sigma, \quad \sigma = E\alpha\Delta T \quad (4)$$

donde K representa el coeficiente de rigidez, A es el área transversal, E corresponde al módulo de Young, $\Delta T = (T - T_a)$, σ es el esfuerzo térmico, y α es el coeficiente de expansión térmica del material.

La expansión térmica para cada sección del micromecanismo en cuestión, se obtiene integrando a lo largo de la estructura misma y sustituyendo la distribución de temperatura apropiada según la ecuación (3) para obtener:

$$\Delta L = \alpha \int_0^L (C_1 e^{Bx} + C_2 e^{-Bx}) dx \quad (5)$$

Finalmente, el desplazamiento mecánico del actuador puede estimarse con base en la expansión térmica de sus componentes empleando alguno de los métodos clásicos de análisis de estructuras en ingeniería como los presentados en (Mankame y Ananthasuresh, 2001; Yan, 2004) que se basan en el cálculo de los momentos de torsión resolviendo una matriz de ecuaciones simultáneas.

Posteriormente, varios diseños de microactuadores fueron analizados y optimizados usando modelos por elemento finito simulados usando un software disponible comercialmente (ANSYS) como se ejemplifica en la Figura 1. Las simulaciones emplearon modelos multi-físicos incluyendo los dominios mecánico, térmico, y eléctrico mientras que se impusieron condiciones de frontera de acuerdo con el análisis matemático descrito con anterioridad. Los modelos computarizados consideraron las propiedades y características de los

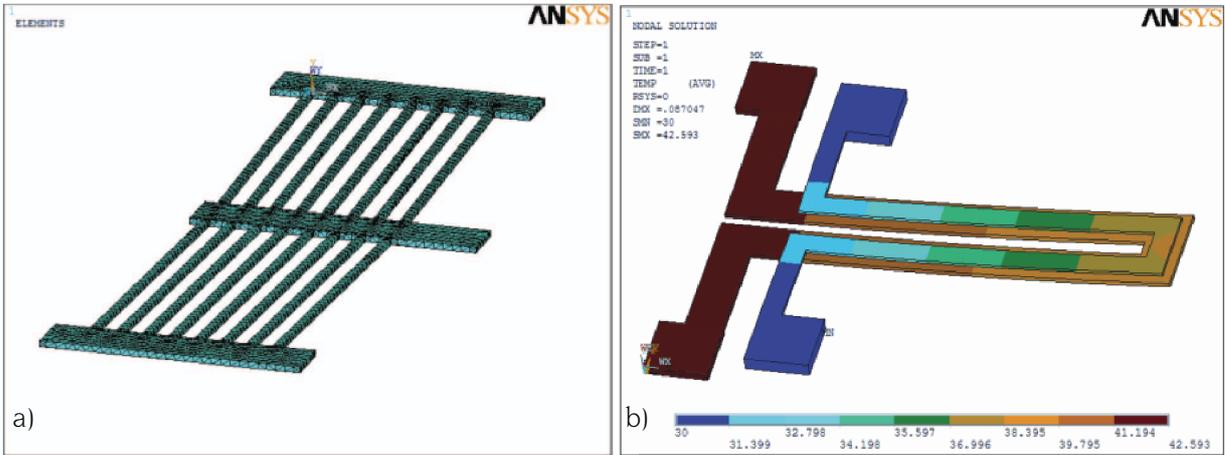


Figura 1. (a) Modelo computarizado para el análisis por elemento finito de un actuador horizontal. (b) Resultado de la simulación para la distribución de temperatura de un actuador vertical tipo "U".

materiales que a la postre fueron utilizados en la fabricación de los diversos microdispositivos.

De esta manera, se diseñaron varios tipos de microactuadores térmicos basados en las topologías de "chevron" y de "brazo vertical" (Long Que *et al.*, 2000; Yan D. *et al.*, 2004), los cuales pueden generar movimiento horizontal y vertical, respectivamente. Los prototipos fueron fabricados en silicio policristalino usando un proceso de micromaquinado de superficie ofrecido por el sistema de MEMS-Multiusuario (MUMPS) como se describe en (Carter *et al.*, 2005).

RESULTADOS

La Figura 2 presenta imágenes de microscopio de dos de los prototipos fabricados.

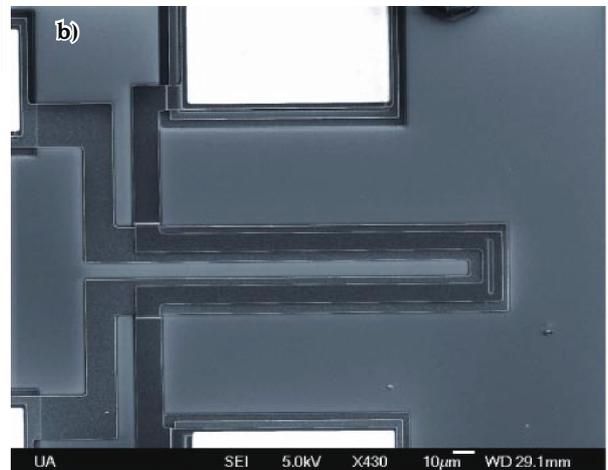
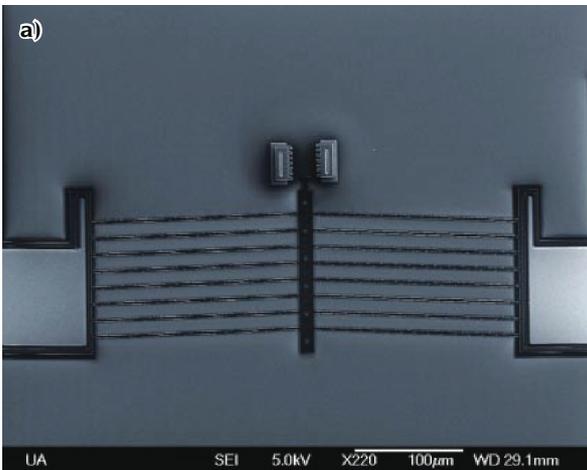


Figura 2. Imágenes de los actuadores fabricados tomadas con microscopio de barrido electrónico (SEM). (a) Actuador horizontal. (b) Actuador vertical.

Se realizaron varias pruebas para caracterizar el desempeño de los dos tipos de actuadores (horizontal y vertical) para varias geometrías y configuraciones distintas. El primer experimento consistió en activar los micromecanismos usando el efecto *Joule*, los resultados se muestran en la Figura 3. El segundo arreglo experimental usó una fuente de calor externa para accionar los dispositivos y probar la idea de aprovechar la energía térmica del medio ambiente como fuente de energía para actuadores MEMS. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.

DISCUSIÓN

En general, puede observarse que es posible activar actuadores térmicos MEMS usando una fuente externa de calor y obtener desplazamien-

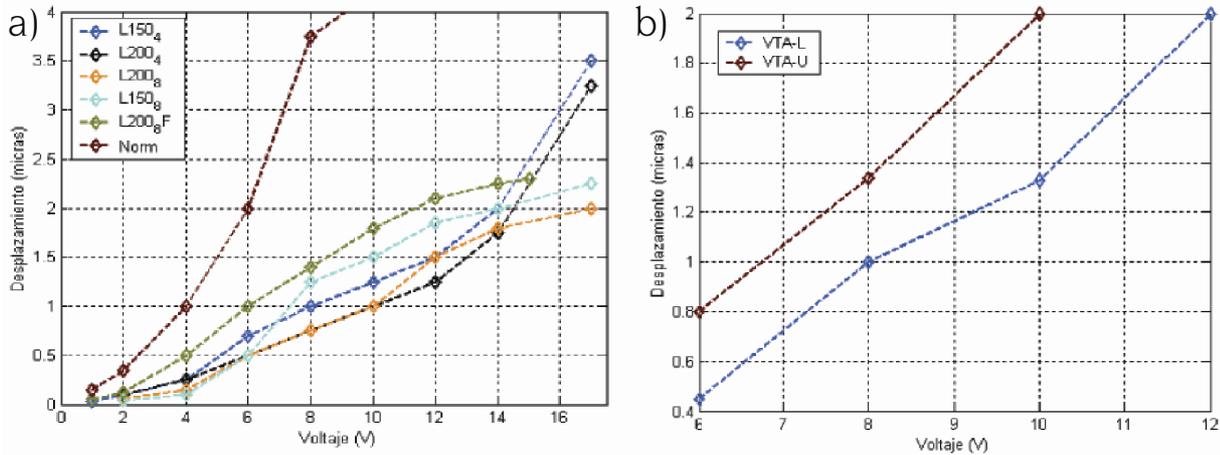


Figura 3. Desplazamiento como función del voltaje aplicado. (a) Actuador horizontal. (b) Actuador vertical.

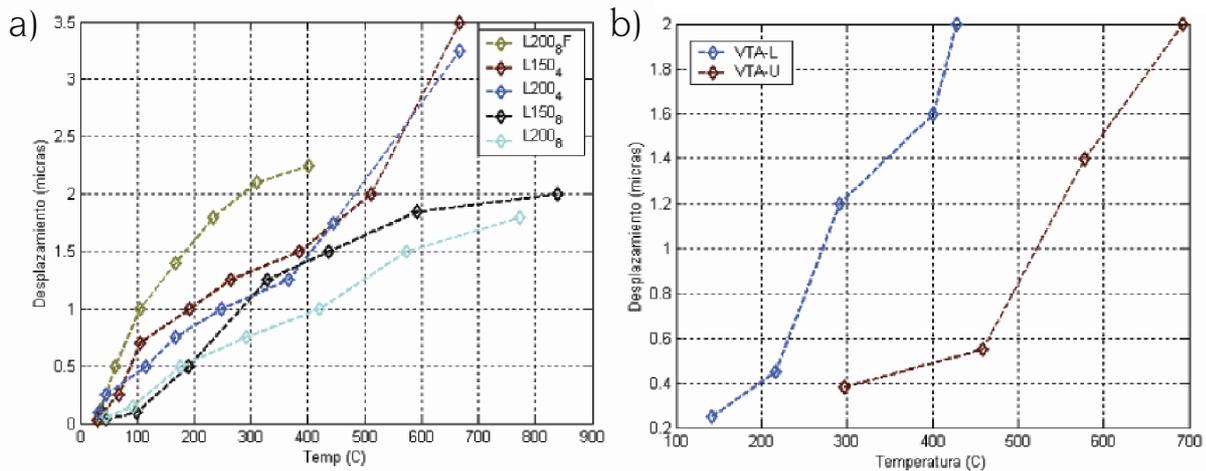


Figura 4. Desplazamiento como función de la temperatura. (a) Actuador horizontal. (b) Actuador vertical.

tos suficientemente significativos para aplicaciones típicas de microsistemas. Para obtener un desplazamiento determinado, la fuente de calor externa requiere alcanzar una temperatura más elevada que la que se desarrolla usando el método convencional por efecto *Joule* para el mismo desplazamiento. Sin embargo, la temperatura en el actuador es considerablemente más baja que cuando se emplea el efecto *Joule* ya que ésta cae rápidamente conforme el calor se transfiere por conducción desde la fuente hacia la estructura del dispositivo. Esto último, representa una ventaja en el incremento del ciclo de vida útil del actuador al reducir el estrés termomecánico al que es sometido. El actuador horizontal con me-

jor desempeño ante la presencia de una fuente de calor externa es el denominado "L200_8F" en el que se incorporaron optimizaciones geométricas para una mejor distribución térmica y mayor aprovechamiento de los momentos de torsión. En el caso del actuador vertical, se demuestra que una estructura en forma de "U" es la que mejor explota el efecto *Joule* (ya que permite formar un circuito eléctrico a través de ésta), mientras que una estructura simple en forma de "L" es más óptima cuando el calor se toma de una fuente externa al minimizar las pérdidas por convección. Diversas fuentes de calor se encuentran disponibles en muchos de los ambientes donde los MEMS se aplican actualmente; tal es el caso de

la industria automotriz y aeroespacial donde temperaturas superiores a los 300°C son muy comunes, así como en la industria electrónica donde los microchips disipan una alta cantidad de energía ($>30\text{W}/\text{cm}^2$) en forma de calor. En general, las fuente de calor puede provenir de la energía solar, por combustión, láser, atómica, etc.

CONCLUSIONES

Los resultados de este proyecto demuestran que es factible la operación de microactuadores tér-

micos accionados por una fuente de calor externa. La posibilidad de contar con micromecanismos y sistemas que puedan operar directamente con energía térmica y sin necesidad de baterías ofrece enormes ventajas en materia de ahorro de energía, resultando además, en productos más pequeños, más ligeros, con mayor rango de operación y de menor costo ya que actualmente las baterías ocupan una gran porción del volumen disponible contribuyendo además de manera significativa en el peso y costo totales.

BIBLIOGRAFÍA

- CARTER J. *et al.*, *PolyMUMPS Design Handbook*, E.U.A.: MEMSCAP Inc., pág. 40, 2005.
- HUANG Q., y LEE N., Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 9, pág. 64-70, 1999.
- LONG QUE, *et al.*, Reliability studies of bent-beam electro-thermal actuators, *Proceedings of the 38th Annual Reliability Physics Symposium, IEEE International*, págs. 118 – 22, abril 2000.
- MANKAME N.D. y ANANTHASURESH G.K., Comprehensive thermal modeling and characterization of an electro-thermal-compliant microactuator, *J. Micromech. Microeng.* vol. 11, págs. 452-462, 2001.
- YAN D., KHAJEPOUR A., MANSOUR R., Design and Modeling of a MEMS bidirectional vertical thermal actuator, *Journal of Micromech. Microeng.*, vol. 14, págs. 841-850, 2004.

DICTIONARIOGRAFÍA

- www.analog.com, 2008.
- www.dlp.com, 2008.