



INAOE

***“Desarrollo y caracterización de
microestructuras Joule con poly-silicio”***

Por:

Fernando Julián Quiñones Novelo.

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el
grado de

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE
ELECTRÓNICA.**

En el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Noviembre 2009
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Wilfrido Calleja Arriaga
Investigador titular del INAOE

© INAOE 2009

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir
copias de esta tesis en su totalidad o en partes.



Resumen.

En los años recientes, en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE se adquirió el compromiso de desarrollar un proceso de fabricación de microcomponentes denominado PolyMEMS INAOE. En este proyecto se tiene el propósito de fabricar *sensores* y *actuadores* utilizando principalmente la técnica de *micromaquinado superficial* con polisilicio. En este contexto, en el INAOE se han desarrollado diversas etapas de fabricación de microestructuras a mediano plazo tendientes a innovar la tecnología de fabricación de Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS, por sus siglas en ingles).

En la actualidad, en la mayoría de los Sistemas MicroElectroMecánicos (MEMS) se incluyen microactuadores, los cuales generan fuerzas de propulsión o desplazamientos para diversos tipos de aplicaciones en microsistemas. Los microactuadores, han sido desarrollados en una amplia variedad de formas, y su funcionamiento se basa en diversos efectos físicos. Los efectos físicos más comunes que se utilizan son: Magnetostático, Electrostático, Piezoeléctrico y Electro-térmico. Entre ellos, los microactuadores que se basan en el efecto Electro-térmico, han atraído más la atención porque producen fuerzas y desplazamientos significativos con voltajes bajos, en comparación con su tamaño.

En este contexto, surge la decisión de formular la presente tesis, que está enfocada a *desarrollar* y *fabricar* microestructuras a base de polisilicio, que funcionen como *microactuadores*. Los microactuadores son desarrollados con una tecnología basada en el llamado: Efecto Joule.

Por otra parte, se presenta también el diseño del Chip PolyMEMS V que sirve como plataforma para caracterizar los microactuadores, así como también, un procedimiento de liberación para obtener exitosamente micro estructuras suspendidas.

Abstract.

In recent years, the INAOE Microelectronics Laboratory has been developing a manufacturing process called micro-PolyMEMS INAOE. This project has been designed to manufacture sensors and actuators using mainly the technique of surface micromachining with polysilicon. In this context, the INAOE has developed several of manufacturing stages of designed microstructures to ensure, in the medium term, possible innovations in manufacturing technologies, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS, for its initials in English).

Currently, the most of microelectromechanical systems (MEMS) include microactuators, which generate propulsive forces and displacements for various types of applications in microsystems. The microactuators have been developed in a wide variety of forms, and its operation is based on various physical effects. Generally physical effects used are: magnetostatic, electrostatic, piezoelectric and electro-thermal. The microactuators based on the Electro-thermal effect have attracted more attention because they produce significant forces and displacements with low applied voltages, compared with its size.

In this context, this thesis, is focused on developing and manufacturing of microstructures based on polysilicon, to work as microactuators. The microactuators are developed with a technology based on the call: Effect Joule.

Moreover, it also shows the design of the V Chip PolyMEMS that serves as a platform for characterizing microactuators, as well as develop a new procedure for successfully release suspended structures.

Dedicado a:

*Liborio, Celmy, Gerardo, Andrés y Mariana.
Mis padres, mis hermanos y mi novia.*

Agradecimientos.

A Dios nuestro señor, por cada día que nos regalas en este mundo.

*A mis padres, por su apoyo, su cariño y comprensión incondicional, muchas gracias, que
Dios siempre los cuide y los bendiga.*

A mis hermanos, que siempre he contado con ellos en cualquier momento.

A mi novia, por apoyarme incondicionalmente y darme su amor.

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización
de mis estudios de Maestría.*

A mi asesor de tesis, Dr. Wilfrido Calleja.

*Al personal técnico del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE, en especial, a Pablo
Alarcón y Mauro Landa.*

*A la Dra. Claudia Reyes Betanzo, por brindarme su ayuda durante la fabricación chip
Poly-MEMS V.*

*A mis sinodales: Dr. Alfonso Torres Jácome, Dr. Carlos Zúñiga Islas, Dr. Mónico
Linares Aranda, Dr. Joel Molina Reyes y Dr. Luis Hernández Martínez.*

Índice.

<i>Resumen</i>	i
<i>Abstract</i>	ii
<i>Dedicatoria</i>	iii
<i>Agradecimientos</i>	iv

<i>Justificación</i>	1
<i>Objetivo</i>	2
<i>Objetivo Particulares</i>	2
<i>Introducción</i>	3

Capítulo 1.

<i>Estado del Arte</i>	7
1. Introducción.....	7
1.1. El efecto Joule.....	7
1.2. Micro actuadores a base de efecto Joule.....	8
1.3. Diseño de Actuadores térmicos.....	10
1.3.1. Actuador Térmico Bimorfo TBA (Thermal Bimorph Actuator).....	10
1.3.2. Actuador de brazos en V Termo-elástico o Thermoelastic V-Beam Actuator (TMV).....	13
1.3.3. Resumen.....	15
Referencias.....	16

Capítulo 2.

<i>Diseño y Fabricación del Chip PolyMEMS V</i>	17
2.1. Introducción.....	17
2.2. Descripción general del chip.	18
2.2. Escalamiento a 3 μm del diseño de polyMEMS V.....	20
2.3. Escalamiento a 5 μm del diseño polyMEMS V.....	20
2.4. Revisión de las micro estructuras.	21
2.4.1. Monitores de esfuerzos mecánicos. 21	
2.4.1.1. Monitor Tipo Puente.	21
2.4.1.2. Monitor Tipo Diamante.....	22
2.4.1.3. Monitor Tipo Trampolín.	24
2.4.1.4. Indicador de Rotación.	25
2.4.2. Micro actuadores TBA.....	27
2.4.3. Micro actuadores TMV.....	30
2.5. Proceso de fabricación de las estructuras.	32
2.6. Caracterización del grabado seco en SF_6	38
2.7. Caracterización del proceso de liberación de las estructuras.	40
2.8. Resumen.	46
Referencias.	47

Capítulo 3.

<i>Resultados Experimentales</i>	48
3.1. Introducción	48
3.1. Caracterización eléctrica.....	50
3.1.1. Voltajes y corrientes de polarización de micro actuadores TBA.....	53
3.1.2. Voltajes y corrientes de polarización de micro actuadores Chevron.....	57
3.2. Esfuerzos mecánicos internos.....	59
3.2.1. Esfuerzos de compresión y tensión.....	59
3.2.1 Gradientes.....	62
3.4. Deflexiones mecánicas bajo estimulación eléctrica.....	64
3.5 Aplicaciones del efecto Joule.....	66
3.5.2 Switch multipuerto para aplicaciones en RF.....	68
3.6. Resumen.....	70
Referencias.....	71

Capítulo 4.

<i>Conclusiones y Trabajo Futuro</i>	72
4.1 Conclusiones Técnicas.....	72
4.2. Conclusiones Generales.....	73
4.3 Trabajo Futuro.....	74

<i>Apéndice A</i>	75
-------------------------	----

<i>Apéndice B</i>	78
-------------------------	----

<i>Índice de Figuras</i>	84
--------------------------------	----

<i>Índice de Tablas</i>	86
-------------------------------	----

Justificación.

En los años recientes, en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE se adquirió el compromiso de desarrollar un proceso de fabricación de microcomponentes denominado PolyMEMS INAOE. En este proyecto se tiene el propósito, de fabricar *sensores* y *actuadores* utilizando principalmente la técnica de *micromaquinado superficial* con polisilicio. Este compromiso tecnológico representa la base fundamental del Proyecto Nacional de MEMS auspiciado por FUMEC, la Secretaria de Economía y el gobierno del estado de Puebla. En este contexto, en el INAOE se han desarrollado diversas etapas de fabricación de microestructuras tendientes a que en el mediano plazo, sea posible innovar en tecnologías de fabricación de Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS, por sus siglas en ingles).

En este contexto, surge la decisión de formular la presente tesis, que está enfocada a ***desarrollar*** y ***fabricar*** microestructuras a base de polisilicio, que funcionen como ***microactuadores***. En las siguientes etapas del proyecto, estas estructuras serán utilizadas en el diseño de circuitos electrónicos de propósito específico utilizando tecnologías MEMS.

Los microactuadores se desarrollaran con una tecnología basada en el llamado: Efecto Joule. Efecto físico que se manifiesta en las propiedades electro-térmicas de los materiales.

De esta forma, se busca estar acorde con los avances tecnológicos mundiales, e impulsar en el País la tecnología de fabricación de microestructuras aplicadas a los MEMS.

Objetivo.

El objetivo general de la presente tesis es:

Diseñar, fabricar y caracterizar bloques básicos de micro-actuadores electro-térmicos utilizando el proceso de fabricación PolyMEMS del INAOE. El diseño de los actuadores se desarrollará considerando aplicaciones prácticas y la compatibilidad con el proceso Bi-CMOS del INAOE.

Objetivo Particulares.

Del objetivo general de la tesis, se desprenden los objetivos particulares siguientes:

- Diseñar micro-estructuras, que sean capaces de generar movimiento mecánico, utilizando técnicas de diseño para aprovechar el efecto Joule.
- Diseñar un nuevo layout (chip PolyMEMS V), para la fabricación y caracterización de los microactuadores y monitores de prueba relacionados.
- Revisar compatibilidad, y si es necesario modificar, el proceso PolyMEMS-INAOE, para fabricar el chip PolyMEMS V.
- Desarrollar un procedimiento de liberación alternativo y compatible, que produzca sistemáticamente, microestructuras Joule suspendidas, estables y libres de colapsos.

Introducción.

En la actualidad, existen múltiples compañías dedicadas a ofrecer servicios comerciales para la fabricación de microestructuras, mediante la tecnología de micromaquinado superficial en base a polisilicio para aplicaciones en MEMS. Los MEMS o Sistemas Micro Electromecánicos (Micro-Electro-Mechanical-Systems), primordialmente integran elementos mecánicos, electrostáticos, ópticos, sensores, actuadores, y la propia circuitería electrónica, en un solo sustrato de silicio.

Las compañías dedicadas a la fabricación de MEMS, emplean distintos procesos de fabricación, y ofrecen distintos servicios a la comunidad tecnológica y científica dedicada a la investigación y comercialización de MEMS. Entre las compañías dedicadas a este rubro, destacan: la compañía MESCAP (www.memscap.com), que ofrece su proceso de fabricación denominado **PolyMUMPS™** o polysilicon Multi-User MEMS Processes y los Laboratorios Sandia (<http://mems.sandia.gov/>), que ofrece su proceso **SUMMiT™** o Sandia Ultra-planar Multi-level MEMS Technology.

PolyMUMPS™ es un proceso que consiste de 3 capas de polisilicio micromaquinado, 2 capas de material de sacrificio y una capa de metal. Además utiliza 8 mascarillas, para generar 7 niveles de capas físicas. La dimensión mínima permisible en el proceso PolyMUMPS™ es de 2µm. Por otra parte, SUMMiT™ es un proceso que utiliza 5 capas de polisilicio micromaquinado, 4 capas de material de sacrificio y 1 capa de metal. Utiliza 14 mascarillas para generar hasta 9 niveles de capas físicas. La dimensión mínima permitida en el proceso SUMMiT™ es de 2µm.

Ambos procesos son capaces de generar microestructuras para MEMS, con formas y diseños variados. En la figura 1 se muestran algunas micromecanismos desarrollados en los Laboratorios Sandia, en donde se pueden apreciar microactuadores electro térmicos.

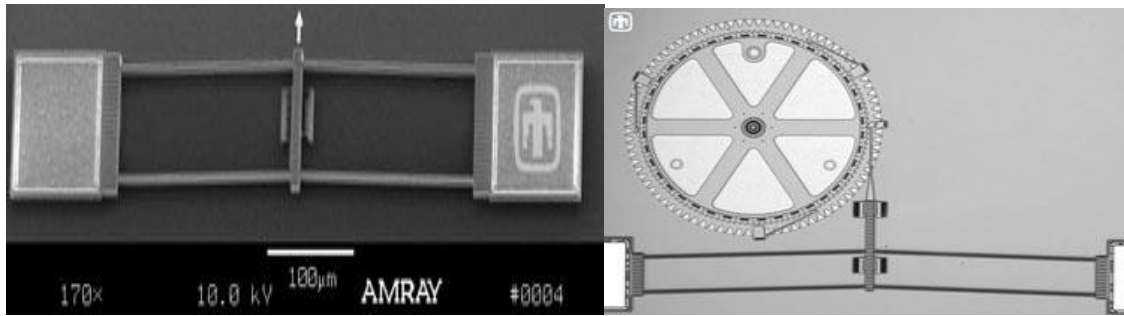


Figura 1. Microactuadores ElectroTérmicos de los laboratorios Sandia, proceso SUMMITT^{MT}.

Por otra parte, en la mayoría de los Sistemas MicroElectroMecánicos (MEMS) se incluyen microactuadores, los cuales generan fuerzas de propulsión o desplazamientos para diversos tipos de aplicaciones en microsistemas. Los microactuadores, han sido desarrollados en una amplia variedad de formas y su funcionamiento se basa en diversos efectos físicos. Los efectos físicos más comunes que se utilizan son: Magnetostático, Electrostático, Piezoeléctrico y Electro-térmico. Entre ellos, los microactuadores que se basan en el efecto Electro-térmico, han atraído más la atención porque producen fuerzas y desplazamientos significativos con voltajes bajos, en comparación con su tamaño (Yuxing, et al., 2006).

La operación de un microactuador electrotérmico, se basa en la expansión térmica de los materiales, que se produce cuando circula una corriente eléctrica a lo largo de sus partes mecánicas. El arreglo físico en forma de lazo asimétrico, sencillo o múltiple, da lugar a que las partes mecánicas se desplacen en función de la corriente que circula en el microactuador. Las propiedades mecánicas del material, la asimetría y las dimensiones estructurales, en conjunto, son fundamentales para calcular las magnitudes de desplazamiento y fuerza de propulsión, que puede desarrollarse en una microestructura dada.

En este trabajo se analizan dos tipos de actuadores Joule: La primera categoría, se basa en la expansión térmica de un lazo sencillo compuesto por materiales con diferente coeficiente de expansión térmica, o bien con diferentes secciones transversales.

La expansión de los materiales, provoca un desplazamiento o deflexión, que puede ser de dos tipos: desplazamiento *paralelo* al plano de anclaje, y desplazamiento *perpendicular* al plano de anclaje. En la Fig. 2 se presenta una estructura con desplazamiento paralelo al plano de anclaje. La segunda categoría corresponde a los actuadores en “V” (Chevron) los cuales generan un desplazamiento rectilíneo perpendicular al plano de anclaje, ver Fig. 3. Las microestructuras y termoactuadores Joule fabricados con polisilicio, son estructuras bastante atractivas para los diseñadores de microsistemas, principalmente por su compatibilidad directa con los procesos de fabricación CMOS.

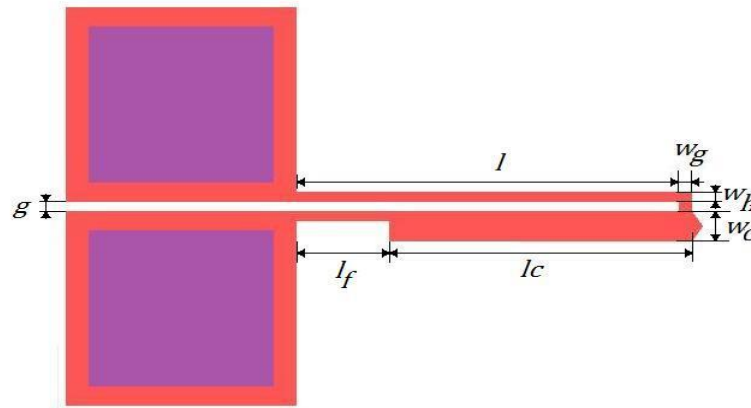


Figura 2. Estructura de un Micro Actuador Térmico Bimorfo (TBA).

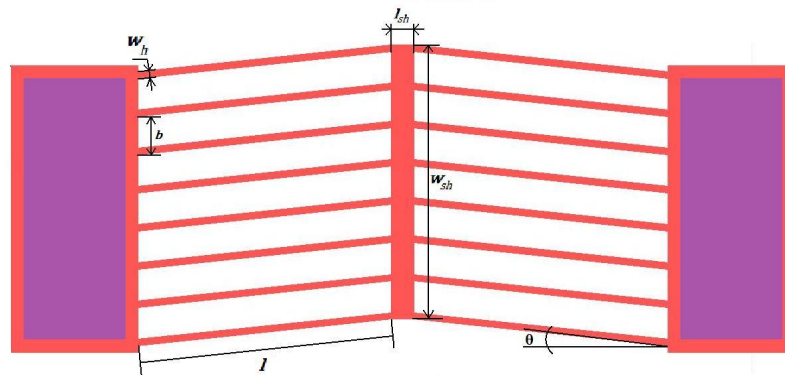


Figura 3. Micro Actuador Térmico tipo Chevron (TMV).

El presente trabajo de tesis se divide en cuatro capítulos. En el capítulo 1 se presenta una revisión sobre el diseño y fabricación de los microactuadores Joule. Se revisan los detalles teóricos del efecto Joule bajo el cual funcionan los dispositivos. También, se describe el funcionamiento de los distintos tipos de microactuadores incluidos en el chip PolyMEMS V. En el capítulo 2 se detallan los aspectos principales de diseño del Chip PolyMEMS V. Se presentan las dimensiones y arreglo físico de cada una de las estructuras, y se justifican las etapas principales del proceso de fabricación. Particularmente, se discuten los detalles del proceso de grabado de las pistas de polisilicio y del subsecuente procedimiento químico de liberación física de las microestructuras, etapas que resultan críticas para producir estructuras suspendidas dinámicas. En el capítulo 3 se presentan los resultados de las pruebas de caracterización realizadas a las diversas microestructuras fabricadas. En el capítulo 4 se listan las conclusiones de la tesis y el trabajo futuro.

Capítulo 1.

Estado del Arte.

1. Introducción.

En el presente capítulo, se presenta el estado del arte de las microestructuras que serán diseñadas e incluidas en el chip PolyMEMS V, desarrollado en la presente tesis. También, se proporciona una breve explicación del efecto Joule, bajo el cual funcionan las microestructuras.

1.1. El efecto Joule

El efecto electro-térmico Joule consiste en que, al hacer circular una corriente eléctrica a través de un material isotérmico se genera calor. Este efecto ocurre en cualquier conductor al que se le aplique una diferencia de potencial. Los electrones del material son impulsados por el campo eléctrico a lo largo de la estructura. Parte de la energía cinética de los electrones se convierte en calor al colisionar con los átomos/moléculas del material. Estas colisiones ocasionan vibraciones en la estructura, que se manifiestan en un incremento de la temperatura, y en una expansión del volumen del material (Alanís Navarro, 2008). La Figura 1.1 ilustra este efecto; matemáticamente se define de la siguiente manera: “La cantidad de *energía calorífica* Q_c , producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula y de la resistencia eléctrica del material”; Ec. 1.1 (Malgorzata, 2003).

$$Q_c = I^2 R t \quad (1.1)$$

Donde Q_c es la energía calorífica producida por la corriente dado en $W \cdot s$, I la intensidad de corriente que circula dada en Amperes, R la resistencia eléctrica del conductor dada en Ω y t el tiempo dado en segundos.

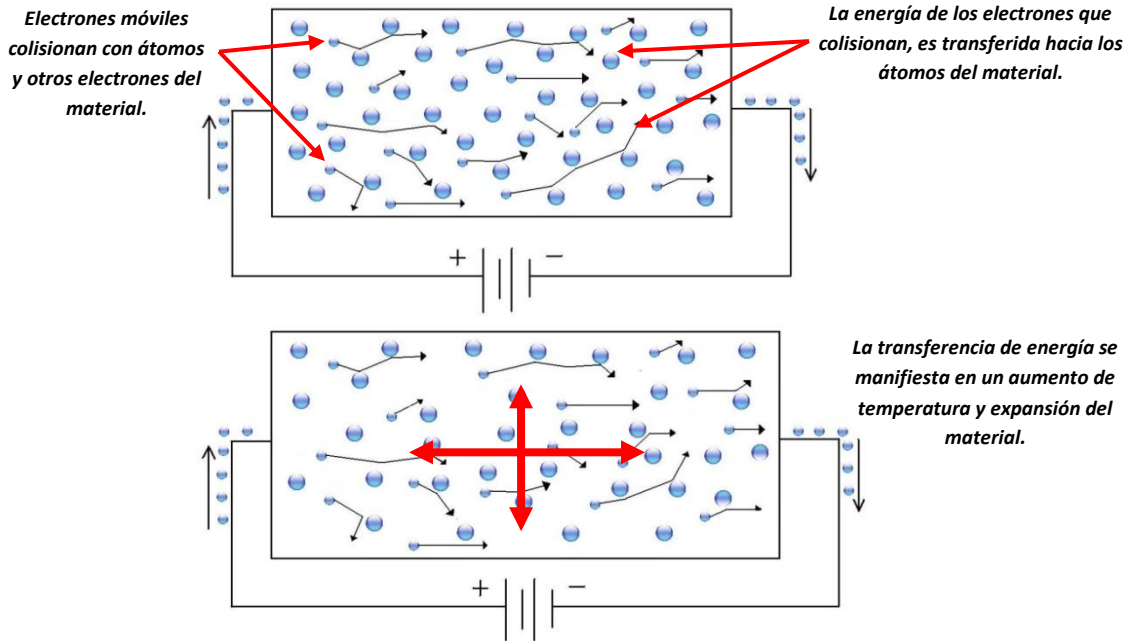


Figura 1. 1 Ilustración del efecto Joule.

1.2. Micro actuadores a base de efecto Joule.

Un micro actuador es un dispositivo que convierte alguna forma de energía (energía eléctrica, mecánica, térmica, magnética, química y radiante), en forma mecánica. Por ejemplo: Una microestructura bimorfa cuyos elementos calefactores resistivos pueden convertir la energía eléctrica en deflexiones mecánicas. (Korvink, et al., 2006)

En algunos actuadores, la señal de salida mecánica es a su vez usada para controlar o modular señales no mecánicas. Esta condición es encontrada en numerosas aplicaciones ópticas como por ejemplo micro espejos (Korvink, et al., 2006). Ejemplos específicos de mecanismos de transducción de actuadores MEMS se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Mecanismos comunes de micro actuadores. (Korvink, et al., 2006)

Entrada general.	Salida general: Mecánica
Eléctrica	Electrostática
Magnética	Piezoeléctrica
	Magnetostática
Mecánica	Neumática
	Hidráulica
Térmica	Expansión
	Combustión
Química	Cambio de Fase

Quizá el uso más simple de estos mecanismos térmicos en MEMS es la operación directa basada en la expansión térmica (Pelesko, et al., 2003). Dos tipos de micro actuadores que aprovechan este mecanismo de transducción son: el actuador de viga en V Termo-elástico o Thermoelastic V-Beam Actuator (TMV), Figura 1.3, y el Actuador Térmico Bimorfo o Thermal Bimorph Actuator (TBA), Figura 1.2.

Los actuadores térmicos pueden generar fuerzas y desplazamientos relativamente grandes, aplicando voltajes pequeños. La deflexión puede incrementarse linealmente, tanto como el voltaje de control es incrementado dentro de un rango. Sin embargo, este tipo de actuadores pueden consumir grandes potencias eléctricas y sus frecuencias de conmutación son bajas (Yan, 2002). Las propiedades físicas involucradas en este tipo actuadores son: la resistividad eléctrica ρ_e , la conductividad térmica κ ; el coeficiente de expansión lineal α o CLTE; el cociente de Poisson ν ; el modulo de Young E , y la densidad ρ ; algunas de las cuales tienen una dependencia con la temperatura, y es un factor importante a considerar por los diseñadores (Leondes, 2006).

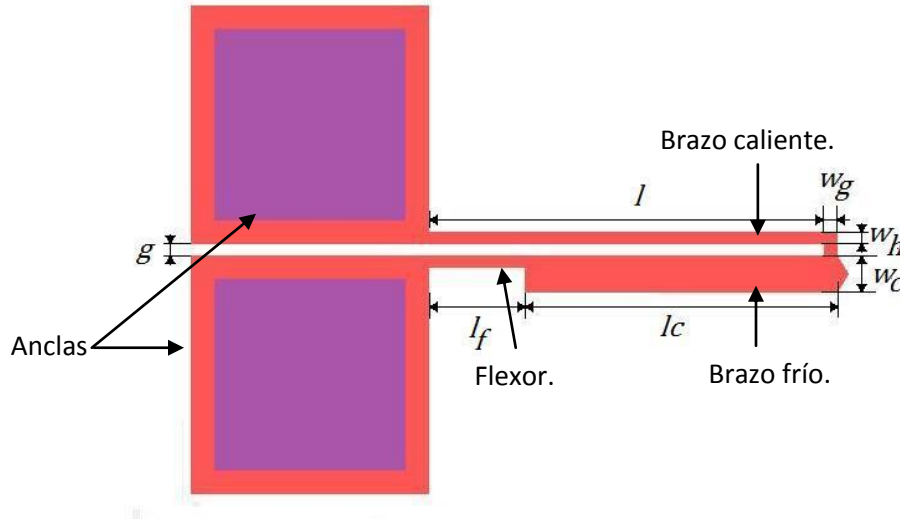


Figura 1. 2 Micro actuador térmico bimorfo (TBA).

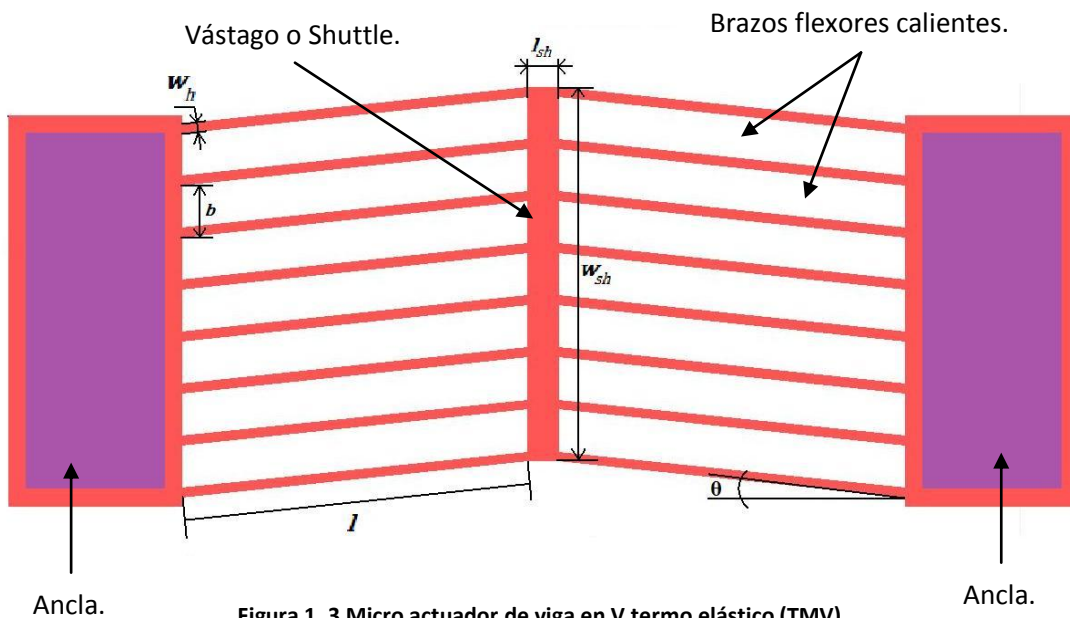


Figura 1. 3 Micro actuador de viga en V termo elástico (TMV).

1.3. Diseño de Actuadores térmicos.

1.3.1. Actuador Térmico Bimorfo TBA (Thermal Bimorph Actuator).

Un actuador térmico bimorfo, fundamentalmente es un trampolín suspendido, formado por dos partes llamados brazo caliente y brazo frío, estas partes se encuentran unidas entre sí y están sujetos mediante dos anclas. Figura 1.2.

El brazo caliente es usualmente más delgado que el brazo frío, de esta forma la resistencia eléctrica del brazo caliente llega a ser más grande que la del brazo frío. Cuando una corriente eléctrica fluye a través de los brazos caliente y frío, el calor generado en el brazo caliente es mayor que la del brazo frío. Puesto que el brazo caliente y frío están hechos del mismo material y tienen el mismo coeficiente térmico de expansión, la diferencia de temperatura causa que el brazo caliente se expanda más que el brazo frío. Esto resulta en el desplazamiento (paralelo al plano de referencia) del actuador (Yan, 2002).

El calentamiento de las estructuras (Calentamiento Joule) Q_J está en función de la resistencia eléctrica, de la corriente que circula por la estructura, y se expresa mediante la Ec. 1.2. La resistencia eléctrica del actuador se obtiene mediante la Ec. 1.3 (Comtois, et al., 1997).

$$Q_J = RI^2 \quad (1.2)$$

$$R = \frac{\rho_e}{h} \left(\frac{l_c}{w_c} + \frac{l}{w_h} + \frac{l_f}{w_f} + \frac{g}{w_g} \right) \quad (1.3)$$

Donde ρ_e es la resistividad del polysilicio, h es el espesor del polysilicio; los parámetros restantes se pueden ver en la Figura 1.2.

Si se conoce la deflexión u del micro actuador, se puede conocer la fuerza impulsora que ejerce el propio actuador mediante la ecuación 1.4 (Quin An, et al., 2000). Esta ecuación está basada en el análisis de estructuras elásticas, y ofrece una muy buena aproximación de la fuerza que ejerce el actuador. El desarrollo de la misma se puede consultar en el apéndice A.

$$F = \frac{6Eu\Delta}{\frac{l_f}{l_f} \{ (2l_c + l) [\Delta_3 + \Delta_2 - \Delta_1(l - l_c)] + (2l + l_c)(\Delta_3 + \Delta_2 g) \} + \frac{l_c^2}{l_c} [3(\Delta_3 + \Delta_2 g - \Delta_1 l) + 2\Delta_1 l_c]} \quad (1.4)$$

Idealmente se espera que el flexor sea lo más delgado posible. Cuando el flexor es delgado, se puede generar más deflexión por la diferencia de expansión térmica entre los brazos caliente y frío.

Pero, si el brazo flexor es más delgado que el brazo caliente, la temperatura del flexor puede ser mayor que la del brazo caliente lo que puede resultar en un sobre calentamiento. Por otra parte, el flexor debe ser lo suficientemente largo para mantener la elasticidad de deflexión. No obstante, si el flexor es muy largo, la deflexión del termo actuador puede ser pequeña. Dado que la corriente eléctrica pasa a través del flexor y del brazo frío, la resistencia del flexor y del brazo frío también contribuye a la resistencia global del termo actuador. La potencia consumida en el flexor y en el brazo frío no contribuye al movimiento deseado de desplazamiento del termo actuador. Solamente la potencia disipada por el brazo caliente es directamente transferida a la deflexión del termo actuador. Algunos esfuerzos han sido dirigidos a resolver estas limitaciones, y mejorar la eficiencia. David M. Burns y Victor M. Bright diseñaron un nuevo termo actuador el cual tiene dos brazos calientes. Ver Figura 1.4. Ambos brazos calientes evitan que el brazo frío y el flexor sean parte del circuito eléctrico. Esto incrementa considerablemente la eficiencia dado que toda la potencia consumida en el actuador contribuye a la deflexión del termo actuador (Yan, 2002). Puesto que en este diseño el flexor queda fuera del circuito eléctrico, el flexor puede ser diseñado para que sea más delgado que los brazos calientes y de esta forma, incrementar la eficiencia. La resistencia eléctrica de este actuador se puede calcular mediante la Ec. 1.4.

$$R = \frac{\rho_e}{h} \left(\frac{l}{w_{ho}} + \frac{l}{w_{hi}} + \frac{g_1}{w_g} \right) \quad (1.4)$$

Donde w_{ho} y w_{hi} son el ancho de los brazos caliente externo e interno respectivamente, g_1 es la longitud de separación entre los brazos interno y externo.

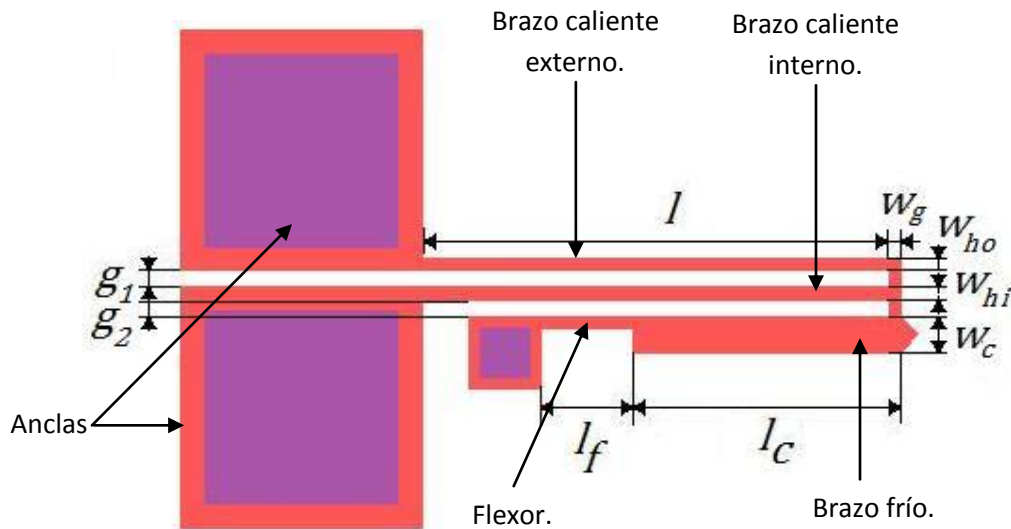


Figura 1. 4 Micro actuador térmico bimorfo de doble brazo caliente.

Para ambos diseños de actuadores (TBA simple y doble brazo) se propone una razón de aspecto entre los brazos frío y caliente de al menos 3 o mayor, es decir: $w_c/w_h \geq 4$. De manera que el brazo frío sea lo bastante ancho como para que se mantenga sin cambio de temperatura y al mismo tiempo el brazo caliente alcance la temperatura suficiente de estiramiento. Tomando esto en cuenta, en el capítulo 2 se proponen las dimensiones apropiadas del diseño de ambos tipos de actuadores.

1.3.2. Actuador de brazos en V Termo-elástico o Thermoelastic V-Beam Actuator (TMV).

El micro actuador de brazo en V, también llamado micro actuador térmico plano o micro actuador chevron, está diseñado a partir de dos terminales o contactos eléctricos anclados al sustrato, un par o más de brazos térmicos extensibles anclados a los contactos eléctricos, sostienen un vástago central Figura 1.3. (Cragun, et al., 1999). Debido a la simetría del micro actuador, cuando una corriente circula a través de los brazos estos se expanden por efecto Joule, y el vástago experimenta una deflexión lineal. Los brazos están dispuestos en un ángulo (θ), precisamente para permitir la deflexión del vástago en la dirección en la que apuntan los brazos. La resistencia del actuador se puede calcular mediante la Ec. 1.5.

$$R_1 = \frac{\rho_e l}{n h w_h} ; \quad R_{sh} = \frac{\rho_e w_{sh}}{h l_{sh}} ;$$
$$R = 2R_1 + R_{sh} \quad (1.5)$$

Donde n es el número de pares de brazos del actuador, l_{sh} es la longitud del vástago o shuttle, w_{sh} es el ancho del vástago, R_{sh} es la resistencia del vástago en serie con los brazos calientes, R_1 es la resistencia equivalente que resulta de calcular en paralelo la resistencia de cada brazo. En la ecuación 1.5, R toma en cuenta el número de pares de brazos y la resistencia del vástago.

La fuerza que ejerce el micro actuador puede ser calculado mediante la medición de la deflexión de un simple trampolín rectangular. Fig. 1.5. Una pequeña deflexión (u) de longitud (l) permite la linearización de las ecuaciones de fuerza, para una pequeña deflexión de una viga o trampolín. La ecuación 1.6 relaciona la cantidad de fuerza necesaria para flexionar una viga (Cragun, et al., 1999). Por lo tanto, la ecuación 1.6 calcula la fuerza que es capaz de desarrollar el micro actuador sobre alguna estructura.

$$F_{beam} = \frac{3uEI}{l^3} \quad (1.6)$$

Donde u es la deflexión medida, E modulo de Young, I es el momento de inercia del trampolín, l es la longitud del trampolín.

En el capítulo 2 se describe el chip PolyMEMS V, diseñado con las estructuras descritas en el presente capítulo. También se describen estructuras incluidas que servirán para monitorear los esfuerzos mecánicos residuales del poly silicio.

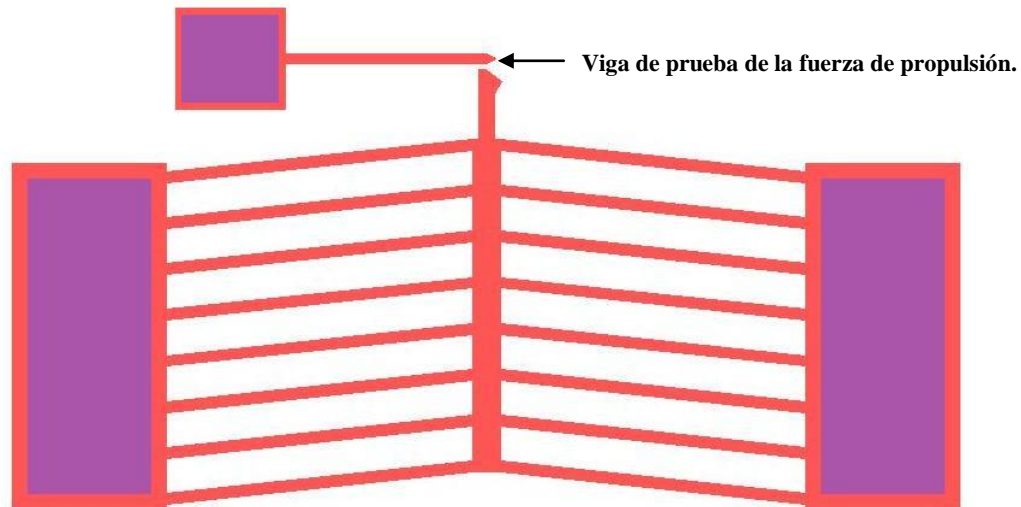


Figura 1. 5 Trampolín de prueba acoplado al shuttle del microactuador.

1.3.3. Resumen.

En este capítulo se realizó una revisión sobre los micro-actuadores que trabajan en base al efecto Joule. También se revisó de manera breve el principio de efecto Joule, bajo el cual funcionan las estructuras. Se dan a conocer las fórmulas para calcular las resistencias eléctricas de cada estructura; De igual forma, se presentan las ecuaciones que calculan la fuerza propulsora que son capaces de desarrollar los micro actuadores.

Referencias.

Alanís Navarro José Andrés Desarrollo del proceso de fabricación PolyMEMS-INAOE [Report] : Tesis. - Puebla, México : [s.n.], 2008.

Comtois J. and Bright V. Applications for surface-micromachining polysilicon thermal actuators and arrays [Journal]. : Sensors and Actuators., 1997. - Vol. A 58 : pp. 1,2,6.

Cragun Rebecca and L. Howell Larry Linear thermomechanical microactuators MEMS. [Book] - ASME, 1999. - Vol. 1: pp. 33-46.

Korvink Jan G. and Paul Oliver MEMS a practical guide to desing, analysis and applications [Book]. - USA : Springer, 2006. - p. 752.

Leondes C. MEMS/NEMS Handbook:Techniques and Applications [Book]. - 2006. - pp. 1,188,189,217-218,22, 238..

Malgorzata S. Joule heat effects on reliability of RF MEMS switches [Book]. - [s.l.] : Thesis, 2003. - pp.62.

Pelesko John A. and Bernstein David H. Modeling MEMS nad NEMS [Book]. - USA : Chapman & Hall/CRC, 2003. - Vol. 1. pp. 45-50.

Quin An Huang and Neville Ka Shek Lee A simple approach to characterizing the driving force of polysilicon laterally driven thermal microactuators [Journal] : Sensors and Actuators. - 2000. - Vol. A. pp. 273, 274.

Yan Dong Mechanicals desing and modeling of MEMS thermal actuators for RF applications [Report] : Tesis / University of Waterloo. - Waterloo, Ontario : [s.n.], 2002.

Yuxing Zhang [et al.] Macro-modeling for polysilicon cascade bent beam electrothermal microactuators [Journal] // Sensors and Actuators / ed. Elsevier. - 2006. - 128 : Vol. A. - pp. 165-175.

Capítulo 2.

Diseño y Fabricación del Chip PolyMEMS V.

2.1. Introducción.

En el presente capítulo se presenta el diseño y el proceso de fabricación del chip PolyMEMS V. Los aspectos centrales del Chip PolyMEMS V para la fabricación de microestructuras dinámicas, radica en el mayor grosor de la película de polisilicio estructural (3 micras) y las pistas con ancho mínimo nominal de 5 micras, además del diseño mecánico-químico para el desarrollo del proceso efectivo de liberación de las microestructuras. Todo lo anterior cubre los lineamientos de fabricación del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE, establecidos de manera general en el proceso PolyMEMS III (Alanís Navarro, 2008).

En el proceso de fabricación, se utilizan dos niveles de polisilicio: poly 1 de $0.5\mu\text{m}$ y poly 2 de $3\mu\text{m}$; un nivel de aluminio de $1\mu\text{m}$, y una capa de PSG de $2.5\mu\text{m}$, como material de sacrificio. Todos los materiales son obtenidos de manera estándar en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE.

En el aspecto estructural de las microestructuras a fabricar, tanto en el diseño como el proceso de fabricación, se revisaron y se establecieron las etapas clave de fabricación para obtener sistemáticamente pistas de 4 y $5\mu\text{m}$ de ancho, para finalmente lograr elementos de polisilicio suspendidos con una razón de aspecto (ancho/grosor) de $5/3$ y $4/3$, que permiten deflexiones horizontales. Además, en el diseño de las estructuras y del proceso, es fundamental establecer las condiciones para asegurar un nivel bajo de esfuerzos mecánicos residuales, que den lugar a un funcionamiento estable de los mecanismos. El hecho de usarse grosores mayores de polisilicio, con ciclos térmicos por dopado más prolongados, obligó a un análisis minucioso del proceso para evitar efectos mecánicos negativos en las estructuras. Un bajo nivel de esfuerzos residuales asegura una adecuada estabilidad estructural a largo plazo.

2.2. Descripción general del chip.

El chip PolyMEMS V, tiene el objetivo de caracterizar microestructuras que funcionan bajo el efecto Joule. Por lo tanto, se desarrollaron dos tipos básicos de micro actuadores Joule, los TMV y los TBA, descritos en el capítulo 1. También, se incluyen estructuras pasivas llamadas: monitores de esfuerzos mecánicos internos. Estas estructuras, se utilizan precisamente para monitorear los esfuerzos mecánicos intrínsecos que puedan presentar las películas de poly-silicio, producto de la fabricación.

Para el desarrollo del chip, se siguieron las reglas geométricas de diseño para el Proceso PolyMEMS del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE (Alanís Navarro, 2008). La figura 2.1 muestra el patrón geométrico del chip PolyMEMS V. En el diseño general del chip se puede observar la distribución de cada una de las estructuras agrupadas por secciones. Las estructuras TBA y TMV, se encuentran señalizadas por letras y números para una identificación más directa

Para fabricar el chip PolyMEMS V, solo se requieren dos niveles de mascarillas. La primera mascarilla, define las bases o anclajes mecánicos de las microestructuras; también se utiliza para definir los contactos eléctricos o pads de metal en las estructura, así como para definir la pasivación de estos contactos, durante el proceso de liberación.

La segunda mascarilla se utiliza para definir los microactuadores y las microestructuras de monitoreo. La Figura 2.2 muestra las mascarillas correspondientes a los dos niveles para el proceso de fabricación. En resumen, estas dos mascarillas definen en total 4 etapas principales de fabricación: Base poly 2, Estructuras Poly 2, Metal 1 y Pasivación.

El primer nivel de polisilicio, Poly 1 sin dopar, permanece como una capa uniforme y completa que aísla las microestructuras del sustrato, pero que a su vez, favorece el mecanismo de secado de las estructuras.

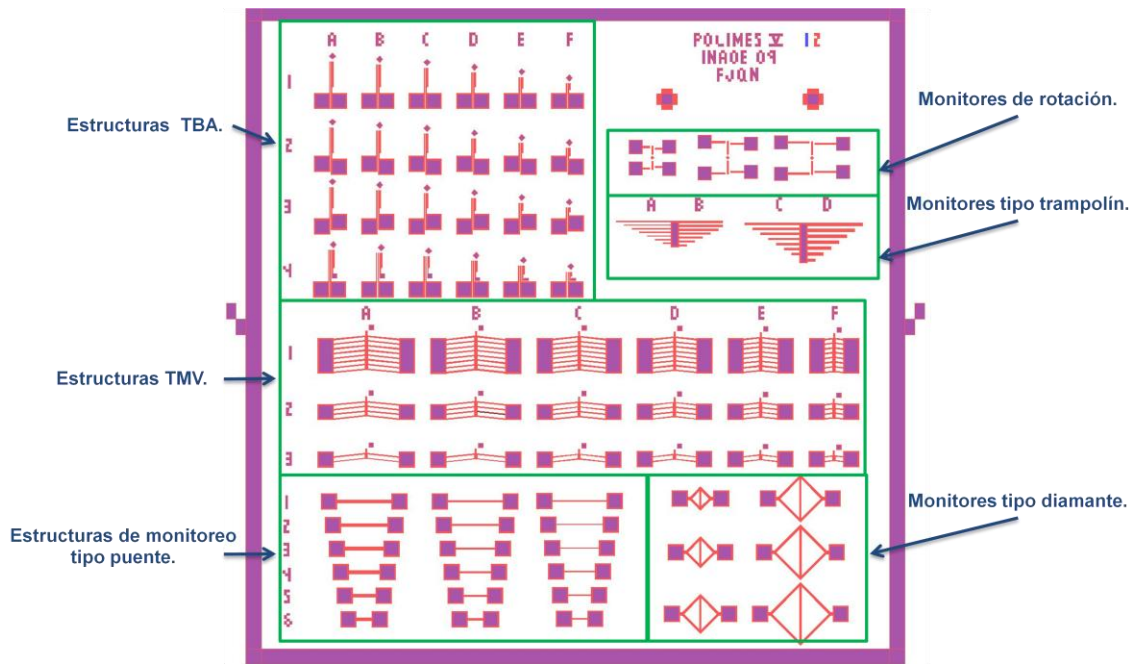
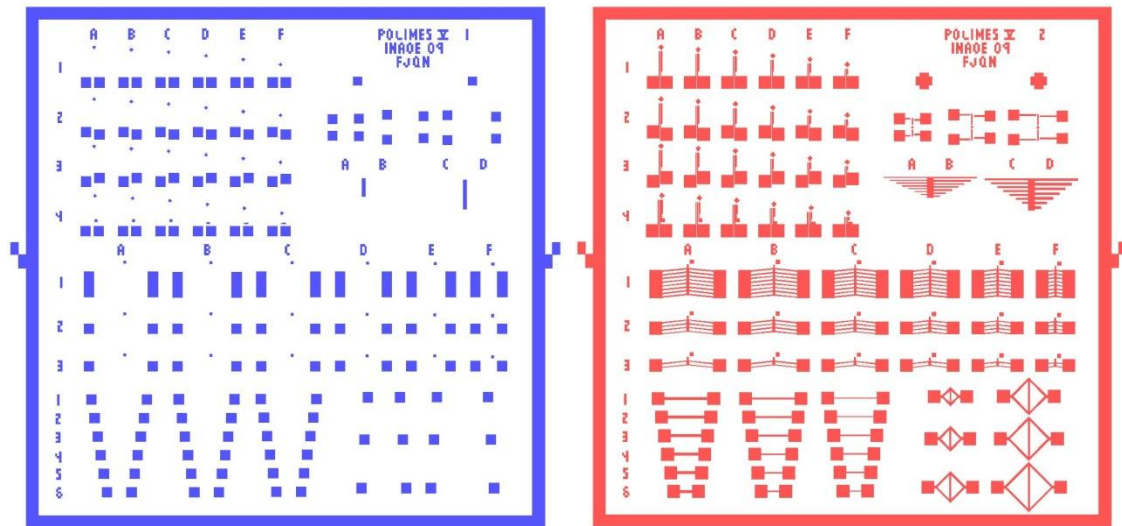


Figura 2. 1 Patrón geométrico del chip PolyMEMS V.



Mascarilla 1: Base Poly 2, Metal 1 y Pasivación.

Mascarilla 2: Poly 2.

Figura 2. 2 Mascarillas para la fabricación del PolyMEMS V.

2.2. Escalamiento a 3 μm del diseño de polyMEMS V.

Inicialmente, el chip PolyMEMS V fue diseñado para ser fabricado con dimensiones mínimas de $3\mu\text{m}$. De esta forma se tendría una razón de aspecto adecuada en las microestructuras, con desplazamiento paralelo al plano del sustrato, ya que, el espesor de polisilicio establecido en $3\mu\text{m}$, permitiría una razón de aspecto de 3/3.

Respecto al diseño de las mascarillas, se consideró su fabricación con la infraestructura disponible, hasta este momento, del nuevo Laboratorio de Nacional de Innovación en MEMS del INAOE. Específicamente, sería utilizado el generador de patrones Heidelberg DWL66 del laboratorio de Nano Electrónica del INAOE. Figura 2.3. Este generador de patrones es capaz de definir geometrías de hasta $1\mu\text{m}$. Sin embargo, debido a fallas técnicas en el equipo, no fue posible generar las mascarillas correspondientes, y se optó por utilizar la infraestructura del laboratorio de microelectrónica del INAOE, considerando sus limitaciones de resolución ya conocidas.

2.3. Escalamiento a 5 μm del diseño polyMEMS V.

Debido al inconveniente mencionado en la sección 2.2, el chip PolyMEMS V fue rediseñado atendiendo las reglas de diseño y fabricación disponibles en el laboratorio de microelectrónica del INAOE. Primordialmente, se cuenta con un área efectiva de trabajo para los chips de $4000 \times 4000 \mu\text{m}^2$. La litografía del laboratorio permite definir geometrías de $5 \mu\text{m}$, tomando en cuenta una $\lambda = 1\mu\text{m}$. La razón de aspecto mínimo, que se puede alcanzar en las secciones transversales de las microestructuras es de 1:1.6; tomando en cuenta un espesor de poly estructural de $3 \mu\text{m}$.

2.4. Revisión de las micro estructuras.

En las siguientes secciones, se hace una descripción y revisión de cada estructura incluida en el chip PolyMEMS V. Cabe mencionar que los monitores de esfuerzo residual mecánico, tipo puente, diamante y trampolín, fueron redimensionados respecto de los diseños considerados en el chip PolyMEMS III, para lograr mayor precisión en el análisis de los esfuerzos residuales.

2.4.1. Monitores de esfuerzos mecánicos.

Como se mencionó anteriormente, estas estructuras son utilizadas para analizar los esfuerzos mecánicos residuales en las películas de polisilicio, después de que las estructuras son liberadas.

2.4.1.1. Monitor Tipo Puente.

La Figura 2.3 (a) muestra la estructura tipo puente, esta estructura está formada por una viga central de poly-silicio, soportada en sus extremos por dos anclas o pads. La estructura debe ser rígida, recta y simétrica, porque estas estructuras se utilizan para determinar la longitud crítica a partir de la cual puede ocurrir colapso o deflexión (buckling) de las estructuras. También, se utilizan para determinar el esfuerzo de compresión residual en las películas delgadas de polisilicio (Díaz Alonzo, 2008). Con respecto al diseño del chip PolyMEMS III, se reporta que la longitud crítica de colapso después de los tratamientos térmicos fue de 400 μm , con un esfuerzo residual de compresión $< 20\text{MPa}$. Sin embargo en el diseño no se incluyeron longitudes intermedias entre 400 y 200 μm , lo que no permite cuantificar con precisión si la longitud crítica, efectivamente corresponde a las 400 μm o a longitudes menores. Debido a esta circunstancia, en el diseño del chip PolyMEMS V, se incluyeron puentes con longitudes que van de 100 a 350 μm . Cabe mencionar que el puente de 400 μm no se incluyó en el diseño, por considerar que a esta longitud se presenta colapso.

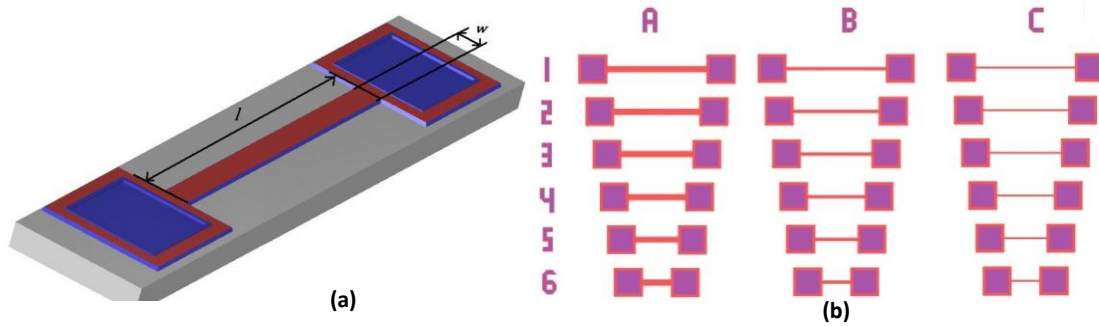


Figura 2. 3 Estructura monitora tipo puente.

Las estructuras puente, se encuentran separadas en tres grupos de 5, 10, y 20 μm de ancho; Estas dimensiones fueron establecidas, tomando en cuenta la necesidad de caracterizar los esfuerzos residuales internos de los microactuadores TMV (Ver sección 2.4.3), que se proyectan similar a una estructura tipo puente.

Las estructuras puente, se encuentran distribuidas en un arreglo matricial etiquetadas por una letra y un número. Fig. 2.3 (b). La tabla 2.1, presenta las dimensiones de cada puente.

Tabla 2. 1 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo puente.

Longitud l (μm)	Ancho (w)		
	20 μm .	10 μm .	5 μm .
350	A1	B1	C1
300	A2	B2	C2
250	A3	B3	C3
200	A4	B4	C4
150	A5	B5	C5
100	A6	B6	C6

2.4.1.2. Monitor Tipo Diamante.

La figura 2.4(a). muestra el monitor de esfuerzo tipo diamante. Al igual que los monitores tipo puente, este se utiliza para monitorear esfuerzos residuales. La estructura está compuesta por un anillo rectangular anclado en dos esquinas opuestas. Una viga central se encuentra suspendida de las dos esquinas restantes. Por efectos de esfuerzos mecánicos la estructura se deforma y como consecuencia un esfuerzo compresivo actúa en la viga central (R. Mutikainen, 1993).

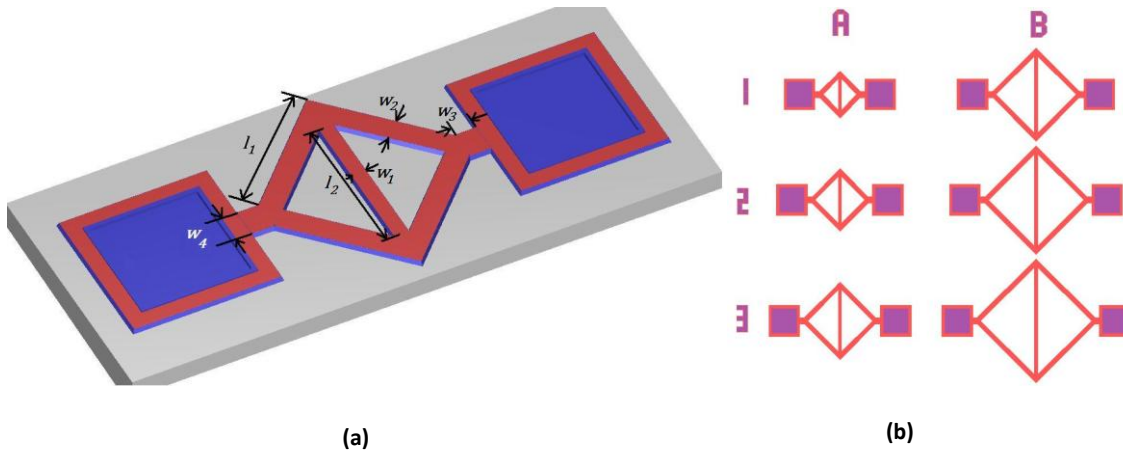


Figura 2. 4 Estructura monitora tipo diamante.

La figura 2.4 (b), muestra el arreglo de las estructuras diamante. Las dimensiones de cada estructura se muestran en la tabla 2.2. Cabe aclarar, que las dimensiones de la estructura, giran en torno a la longitud l_2 y el ancho w_1 . Lo que se busca es que la viga central amplifique y exhiba una deformación (buckling) evidente. A igual que los monitores tipo puente, las estructuras diamante se diseñan para analizar los esfuerzos residuales presentes en los microactuadores TMV, ya que un esfuerzo de compresión o de estiramiento afecta directamente a las estructuras tipo puente.

Tabla 2. 2 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo diamante.

Estructura	Longitud l_1 (μm)	Longitud l_2 (μm)	Ancho w_1 (μm)	Ancho w_2 (μm)	Ancho w_3 (μm)	Ancho w_4 (μm)
A1	94	100	10	15	15	20
A2	129	150	10	15	15	20
A3	164	200	10	15	15	20
B1	200	250	10	15	15	20
B2	235	300	10	15	15	20
B3	270	350	10	15	15	20

2.4.1.3. Monitor Tipo Trampolín.

El monitor de esfuerzo tipo trampolín, consiste de una viga suspendida anclada en un extremo. Se utiliza como una herramienta para medir el gradiente de esfuerzo residual, ya que estas estructuras sometidas a dicho esfuerzo exhiben una deformación vertical en forma de arco; y que es proporcional a la magnitud del gradiente de esfuerzo residual. Los trampolines están dispuestos en arreglo serie, y agrupadas según sus anchos. Además, están señalizadas por letras para una identificación más fácil, tal y como lo muestra la figura 2.5 (b). Las dimensiones de las estructuras se presentan en la tabla 2.3 La separación entre cada trampolín es de 20 μm .

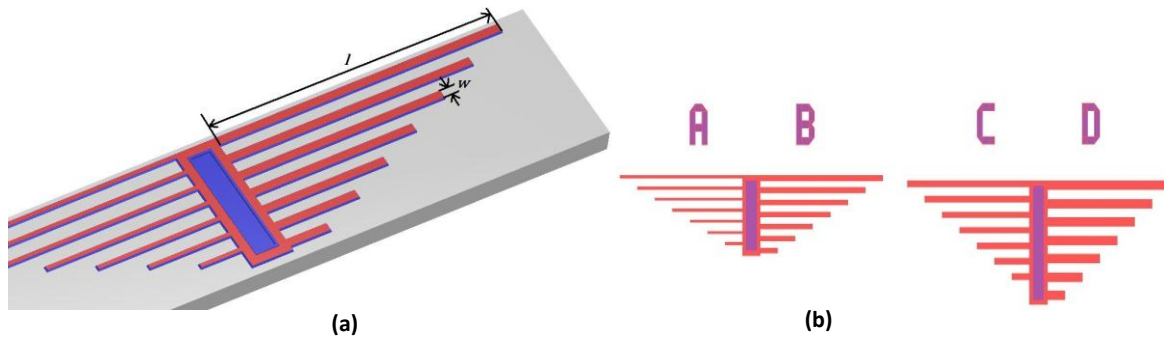


Figura 2. 5 Estructura monitora tipo trampolín.

Las dimensiones de los trampolines fueron establecidas con el propósito de caracterizar el gradiente de esfuerzo que pudieran presentarse en los microactuadores TBA (Ver sección 2.4.2). Este tipo de microactuadores se ven afectados por los gradientes de esfuerzo internos, por ser estructuras con forma de trampolín. Por ello, los anchos de los trampolines fueron establecidos, tomando en cuenta los anchos de los microactuadores TBA.

Los trampolines tienen longitudes entre 100 y 350 μm para poder medir con precisión los gradientes de esfuerzo; debido a que en el diseño del chip PolyMEMS III solo se consideró trampolines de 100, 200 y 400 micras. El cálculo del gradiente de esfuerzo residual ($<10\text{MPa}/\mu\text{m}$), reportado por (Alanís Navarro, 2008), se realizó en un trampolín con longitud de 200 μm .

Por lo tanto, es necesario conocer si los gradientes de esfuerzo se presentan en longitudes de 150 μm , para asegurar una medición más precisa. Respecto a los trampolines con longitudes mayores a 200 μm , se incluyeron para averiguar si se podían obtener estructuras suspendidas con longitudes mayores a 200 micras y menores a la longitud crítica de 400 micras.

Tabla 2. 3 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo trampolín.

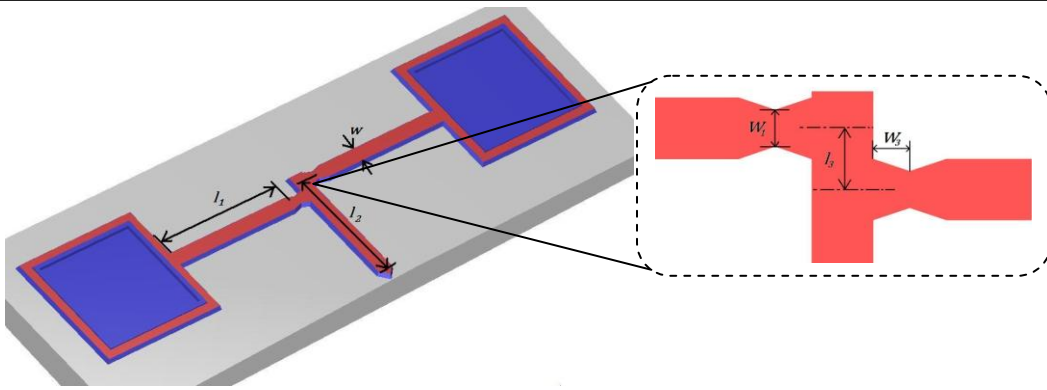
Longitud l (μm)	Ancho (w) 5 μm	Ancho (w) 10 μm	Ancho (w) 12 μm	Ancho (w) 18 μm
350	A1	B1	C1	D1
300	A2	B2	C2	D2
250	A3	B3	C3	D3
200	A4	B4	C4	D4
150	A5	B5	C5	D5
100	A6	B6	C6	D6
50	A7	B7	C7	D7

2.4.1.4. Indicador de Rotación.

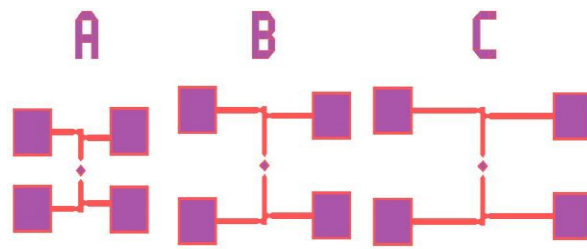
La estructura llamada indicador de rotación, se muestra en la figura 2.6 (a). Dicho indicador, transforma la deformación del material, producto de un esfuerzo mecánico, en una rotación cuyo ángulo es directamente proporcional a la magnitud de esfuerzo (Van Driehuisen, et al., 1993).

El monitor de rotación está formado por dos trampolines que funcionan como brazos de sujeción. Dichos brazos sostienen una viga central, la viga central funciona como el indicador de la rotación.

Un esfuerzo mecánico en los brazos, provoca una deformación en ellos. La deformación se puede manifestar como un estiramiento o compresión en la longitud de los brazos, lo que da origen a una rotación en la viga central. Para facilitar la medición del desplazamiento, es conveniente utilizar dos estructuras como forma de amplificación. En total son 3 pares de indicadores los que se incluyeron en el chip. Fig. 2.6 (b). Las dimensiones de cada par de estructuras se muestran en la tabla 2.4.



(a)



(b)

Figura 2. 6 Estructura de análisis de esfuerzos tipo rotación.

Tabla 2. 4 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo rotación.

Estructura.	l_1	l_2	l_3	w	w_1	w_2
A	47	37	10	10	6	6
B	88	67	10	10	6	6
C	138	69	10	10	6	6

2.4.2. Micro actuadores TBA.

Como se expuso en el capítulo 1, los micro actuadores TBA son dispositivos que aprovechan el principio de calentamiento–expansión por efecto Joule. En la figura 2.7 se muestra la notación de las dimensiones de la estructura Joule convencional. Como se mencionó en la sección 2.1 las estructuras Joule se encuentran ubicadas en la parte superior derecha del chip PolyMEMS V. Fig. 2.1. La primera fila corresponde a estructuras TBA convencionales. Se dice que son convencionales porque las longitudes del brazo caliente y brazo frío son las mismas, es decir, ninguno es más largo que el otro.

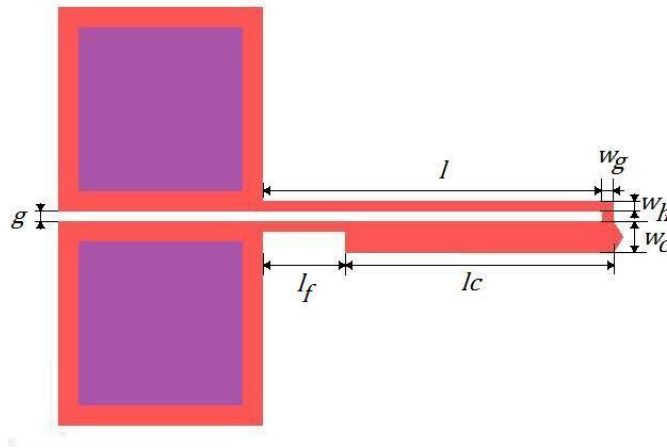
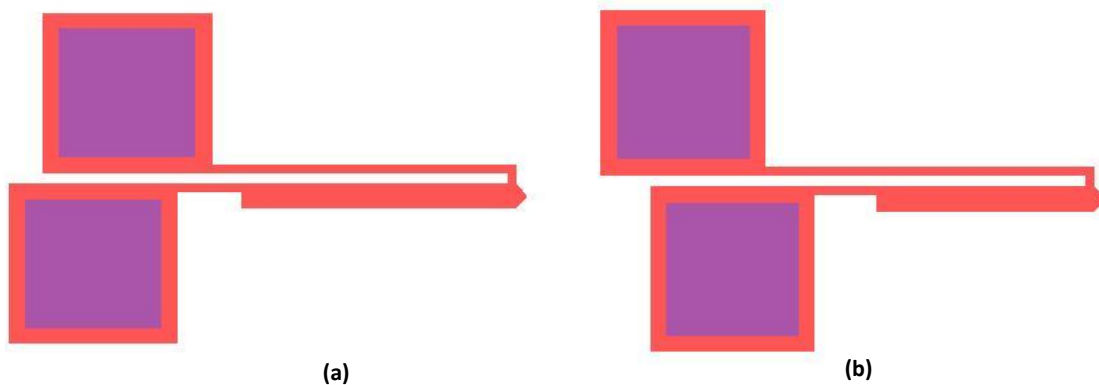


Figura 2. 7 Estructura de un Micro Actuator Térmico Bimorfo (TBA).

Una variante de los dispositivos TBA convencionales, es el arreglo TBA de brazo caliente corto (TBA-HS), figura 2.8 (a). Este actuator ejerce mucho más fuerza de propulsión, pero a costa de menor rango de acción, es decir menor rango de desplazamiento (Youngjun, et al., 2004). Otra variante TBA, es el actuator TBA de brazo caliente largo (TBA-HL). Figura 2.8 (b), este tipo de actuator es capaz de generar mayor deflexión, sin embargo, la fuerza de propulsión se ve disminuida (Youngjun, et al., 2004). En el diseño del chip, se incluyeron los tres tipos de actuadores, los cuales están dispuestos en un arreglo matricial de estructuras, cuyas filas corresponden a un solo tipo de actuator. En cada fila los actuadores están diseñados con dimensiones distintas, variando las dimensiones de los brazos, dispuestos de tal forma que van de un actuator largo hasta un actuator corto.

Todo el arreglo matricial se encuentra identificado; las letras señalan las columnas y los números señalan las filas, de manera que se puedan identificar fácilmente.



**Figura 2. 8 a) Micro Actuador Térmico Bimorfo de brazo caliente Corto (TBA-HS).
b) Micro Actuador Térmico Bimorfo de brazo Caliente Largo (TBA-HL).**

Ningún arreglo TBA, excede una longitud mayor a 200 μm , ya que, en el diseño PolyMEMS III solo fueron incluidos trampolines de 200 y 400 micras, y ninguna longitud intermedia. Y debido a que el estudio presentado por (Alanís Navarro, 2008), la longitud crítica de colapso fue calculada en 400 micras pero el gradiente crítico de esfuerzos residuales se presentó en trampolines de 200 micras de largo. Este hecho dio lugar a un análisis minucioso respecto a las posibilidades de incluir microactuadores con longitudes intermedias entre 200 y 400 micras. Por lo tanto, para asegurar estructuras TBA liberadas y suspendidas sin riesgo de colapso, en este trabajo se optó por diseñar microactuadores de hasta 200 μm de largo. Las dimensiones de las estructuras se presentan en las tablas 2.5, 2.6 y 2.7.

Tabla 2. 6 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA convencionales.

Dimensiones (μm).								
Estructura.	l	l _c	l _f	w _h	w _c	w _g	w _f	g
A1	200	162	38	5	15	5	5	7
B1	180	142	38	5	15	5	5	7
C1	160	122	38	5	15	5	5	7
D1	130	92	38	5	15	5	5	7
E1	100	70	30	5	15	5	5	7
F1	60	40	20	5	15	5	5	7

Tabla 2. 5 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA-HS.

Dimensiones (μm).								
Estructura.	l	l _c	l _f	w _h	w _c	w _g	w _f	g
A2	180	162	38	5	15	5	5	7
B2	160	142	38	5	15	5	5	7
C2	140	122	38	5	15	5	5	7
D2	110	92	38	5	15	5	5	7
E2	80	62	38	5	15	5	5	7
F2	50	50	20	5	15	5	5	7

Tabla 2. 7 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA-HL.

Estructura.	Dimensiones (μm).							
	l	l_c	l_f	w_h	w_c	w_g	w_f	g
A3	200	132	38	5	15	5	5	7
B3	180	112	38	5	15	5	5	7
C3	160	92	38	5	15	5	5	7
D3	130	80	20	5	15	5	5	7
E3	100	50	20	5	15	5	5	7
F3	70	30	20	5	15	5	5	7

Otra variante de TBA, es el TBA de doble brazo caliente (TBA-DH), Figura 2.9. Estos microactuadores se encuentran localizados en la fila 4 de la sección de TBA's del chip PolyMEMS V, Figura 2.9.

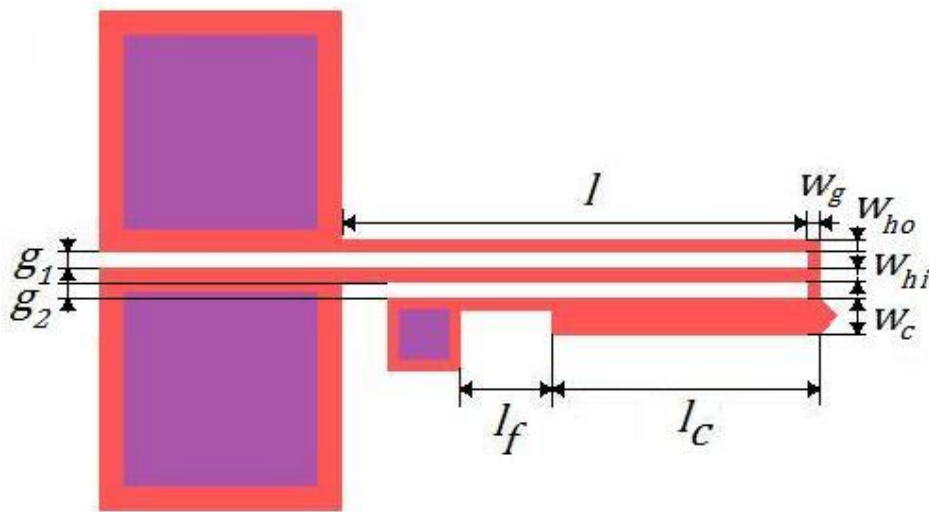


Figura 2. 9 Micro actuador Térmico Bimorfo de Doble Brazo Caliente TBA-DH.

Como se menciona en capítulo 1, el TBA-DH es una variante del TBA convencional, y esta optimizado para aprovechar mejor la potencia eléctrica suministrada, para generar la fuerza propulsora. De igual manera, las longitudes de los brazos no exceden la longitud de 200 micras, debido a los argumentos antes expuestos. En la tabla 2.8 se muestran las dimensiones de cada actuador.

Tabla 2. 8 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA-DH.

Estructura.	Dimensiones (μm).									
	l	l_c	l_f	w_{ho}	w_{hi}	w_c	w_f	w_g	g_1	g_2
A4	200	112	38	5	5	15	5	5	7	7
B4	180	92	38	5	5	15	5	5	7	7
C4	160	72	38	5	5	15	5	5	7	7
D4	130	67	38	5	5	15	5	5	7	7
E4	100	55	30	5	5	15	5	5	7	7
F4	60	25	20	5	5	15	5	5	7	7

2.4.3. Micro actuadores TMV.

En el chip polyMEMS V, el micro actuador TMV se encuentran posicionado en el centro del chip, en forma de un arreglo matricial. Figura 2.1. En total son 18 estructuras, y se encuentran separadas en tres filas, cada fila agrupa a las estructuras que tienen las mismas dimensiones en sus anchos y números de brazos. Es decir, en la fila 1 se agrupan los TMVs con 8 brazos y $7\mu\text{m}$ de ancho, la Fila 2 agrupa los TMVs con 4 brazos y $5\mu\text{m}$ de ancho y la Fila 3 agrupa a los TMVs con 2 brazos y $5\mu\text{m}$ de ancho. Todos los brazos calientes de los TMVs tienen un ángulo de inclinación θ de 6° . Dicho ángulo permite dirigir la deflexión de cada brazo y de esta manera se dirige la acción de propulsión del actuador. La figura 2.10 muestra un esquema del actuador TMV (chevron), con un trampolín de referencia, con su correspondiente notación de dimensiones estructurales.

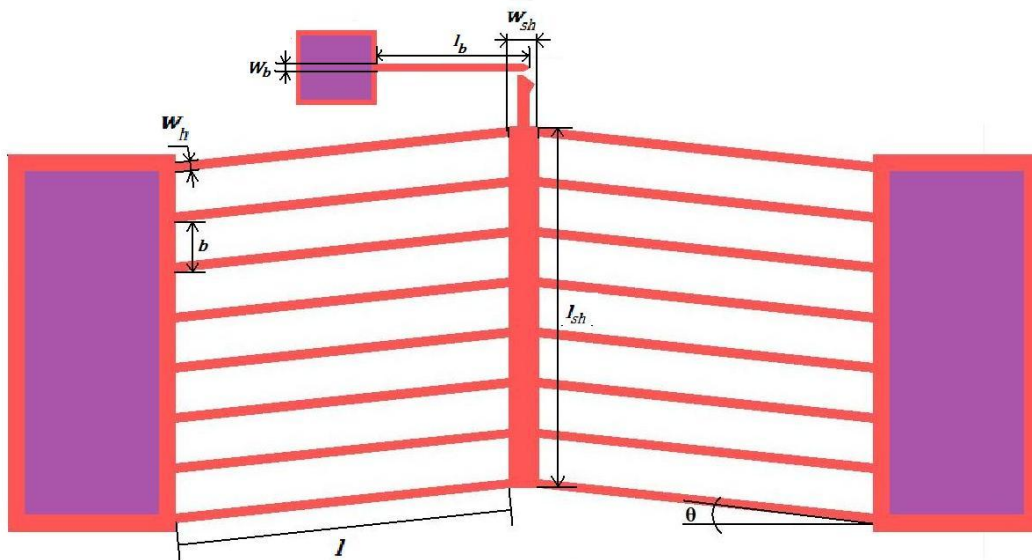


Figura 2. 10 Micro Actuador Térmico Chevron (TMV).

En el esquema de la figura 2.10, aparece un trampolín ubicado en la parte superior del microactuador TMV. Este trampolín se utiliza para calcular la fuerza ejercida por la estructura, utilizando la ecuación 1.6 (Cragun, et al., 1999). Sin embargo, en el diseño del layout del chip PolyMEMS V, no se pudo incluir dicho trampolín. No obstante, se recomienda incluirlo en los diseños posteriores al chip PolyMEMS V. La longitud l_b y el ancho w_b recomendados por (Cragun, et al., 1999), son $l_b = 50, 60$ ó $70\mu\text{m}$; y $w_b = 3, 4$ ó $5\mu\text{m}$.

Como se mencionó antes, la longitud crítica de colapso fue establecida en 400 micras. Considerando este hecho, la longitud máxima de los brazos calientes se fijó en 200 micras. De tal forma que la longitud total del microactuador TMV más largo fué de 418 micras, tomando en cuenta el ancho del vástago entre los brazos. Aunque la longitud total del microactuador más largo excedió la longitud crítica por $18\mu\text{m}$, se decidió incluirlas en el diseño, porque se proyectó que el conjunto de brazos (TMV con 8, 4 y 2 brazos) proporcionaría a la estructura mayor estabilidad mecánica, respecto al caso de un puente simple. Las dimensiones de las estructuras se muestran en las Tablas 2.9, 2.10 y 2.11.

Tabla 2. 9 Dimensiones para el arreglo de la fila 1 de TMVs.

Dimensiones (μm).					
Estructura.	l	l_{sh}	w_h	w_{sh}	b
A1	200	217	7	18	30
B1	180	217	7	18	30
C1	160	217	7	18	30
D1	130	217	7	18	30
E1	100	217	7	18	30
F1	50	217	7	18	30

Tabla 2. 10 Dimensiones para el arreglo de la fila 2 de TMVs.

Dimensiones (μm).					
Estructura.	l	l_{sh}	w_h	w_{sh}	b
A2	200	96	6	18	30
B2	180	96	6	18	30
C2	160	96	6	18	30
D2	130	96	6	18	30
E2	100	96	6	18	30
F2	50	96	6	18	30

Tabla 2. 11 Dimensiones para el arreglo de la fila 3 de TMVs.

Dimensiones (μm).					
Estructura.	l	l_{sh}	w_h	w_{sh}	b
A3	200	35	5	18	30
B3	180	35	5	18	30
C3	160	35	5	18	30
D3	130	35	5	18	30
E3	100	35	5	18	30
F1	50	35	5	18	30

2.5. Proceso de fabricación de las estructuras.

A continuación se presenta el proceso de fabricación del chip PolyMEMS V, utilizando la técnica de micro maquinado superficial. Dicho proceso, parte de las bases sentadas en el proceso PolyMEMS-INAOE. Cabe mencionar que se hicieron modificaciones al proceso PolyMEMS, para hacerlo compatible con la fabricación del chip con estructuras Joule.

Como referencia, el proceso completo PolyMEMS-INAOE, utiliza cinco materiales: Dos niveles de materiales estructurales de poly-Si, uno fijo al sustrato utilizado como electrodo (Poly 1), y un nivel suspendido para la fabricación de mecanismos, sensores y actuadores principalmente (Poly 2); vidrio de Fosfosilicato (PSG) como material de sacrificio (o soporte mecánico temporal), aluminio (Al) como material de interconexión eléctrica, y dióxido (SiO_2) y Nitruro (Si_3N_4) de silicio, como aislantes eléctricos y para incrementar la selectividad. Así mismo, en este proceso se utilizan nueve niveles de mascarillas; y como soporte mecánico se utilizan obleas de silicio cristalino con orientación (100) de 2" de diámetro.

Las modificaciones principales en el proceso para fabricar el Chip PolyMEMS V, son las siguientes:

1. A diferencia del proceso PolyMEMS-INAOE, en lugar de utilizar Nitruro de silicio, se utiliza polisilicio *sin dopar* (Poly 1), como capa continua, que aísla las microestructuras del sustrato. Además, se aprovecha su naturaleza hidrofóbica para disminuir las probabilidades de colapsos en las microestructuras durante el proceso de liberación; ya que el proceso de liberación es totalmente húmedo y se busca disminuir la tensión superficial que ejercen los líquidos (Agua, Acetona, 2-propanol) utilizados durante los enjuagues.
2. En lugar de utilizar 9 niveles de *mascarillas*, solo se utilizan 2 niveles: el primer nivel se utiliza para definir las bases de fijación al sustrato, también, se utiliza para definir los contactos eléctricos de cada microestructura; El segundo nivel se utiliza para definir la litografía de las microestructuras Joule, y monitores mecánicos. Esta modificación permite definir las bases de fijación y las microestructuras, con un solo depósito estándar de polisilicio (Poly 2).

3. En el proceso PolyMEMS-INAOE se utiliza KOH, como grabante húmedo del polisilicio para definir las microestructuras. Como se sabe, este procedimiento genera paredes verticales con rampas de $\sim 54^\circ$ de inclinación en las pistas de polisilicio. Por esta razón, se sustituyó el grabado húmedo con KOH, por un proceso de grabado seco mediante RIE; con el fin de mejorar la verticalidad en los perfiles de las microestructuras. Para más detalles consulte la sección 2.6.

4. Considerando las capacidades técnicas y de infraestructura del laboratorio de microelectrónica del INAOE. El proceso de liberación planteado en este trabajo, es totalmente húmedo y utiliza únicamente los líquidos: Agua DI, Acetona y 2-propanol durante la liberación; A diferencia del proceso anterior que utiliza fotoresina litográfica como soporte temporal de las microestructuras liberadas, y grabado con Oxígeno por RIE, para terminar de liberar las microestructuras. Para consultar los detalles de la liberación refiérase a la sección 2.7.

El proceso completo de fabricación del chip PolyMEMS V, se ilustra en las figuras 2.11 y 2.12. A continuación se exponen los detalles del proceso de fabricación.

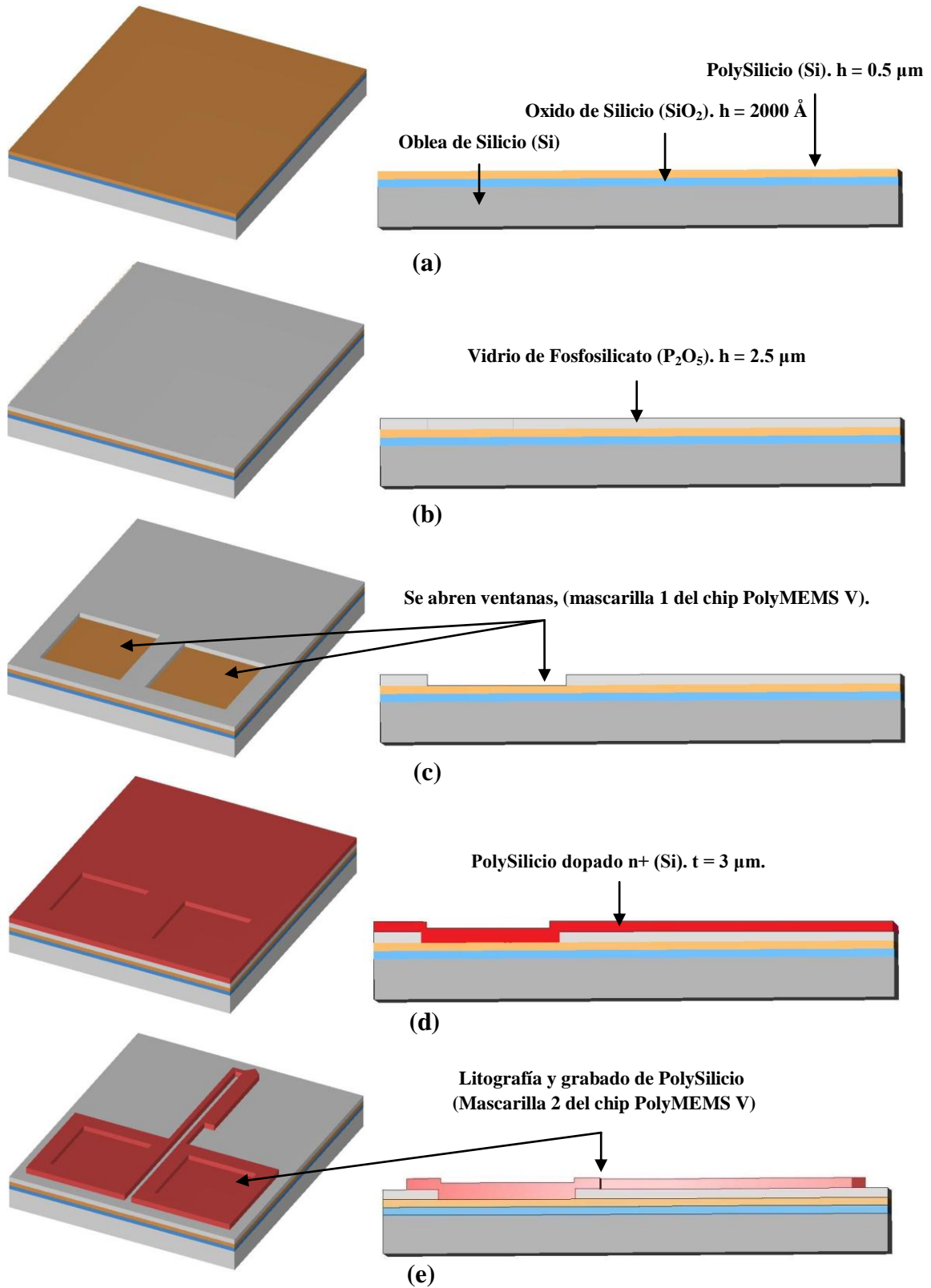


Figura 2. 11 Esquema en 3D del proceso de fabricación de las microestructuras.

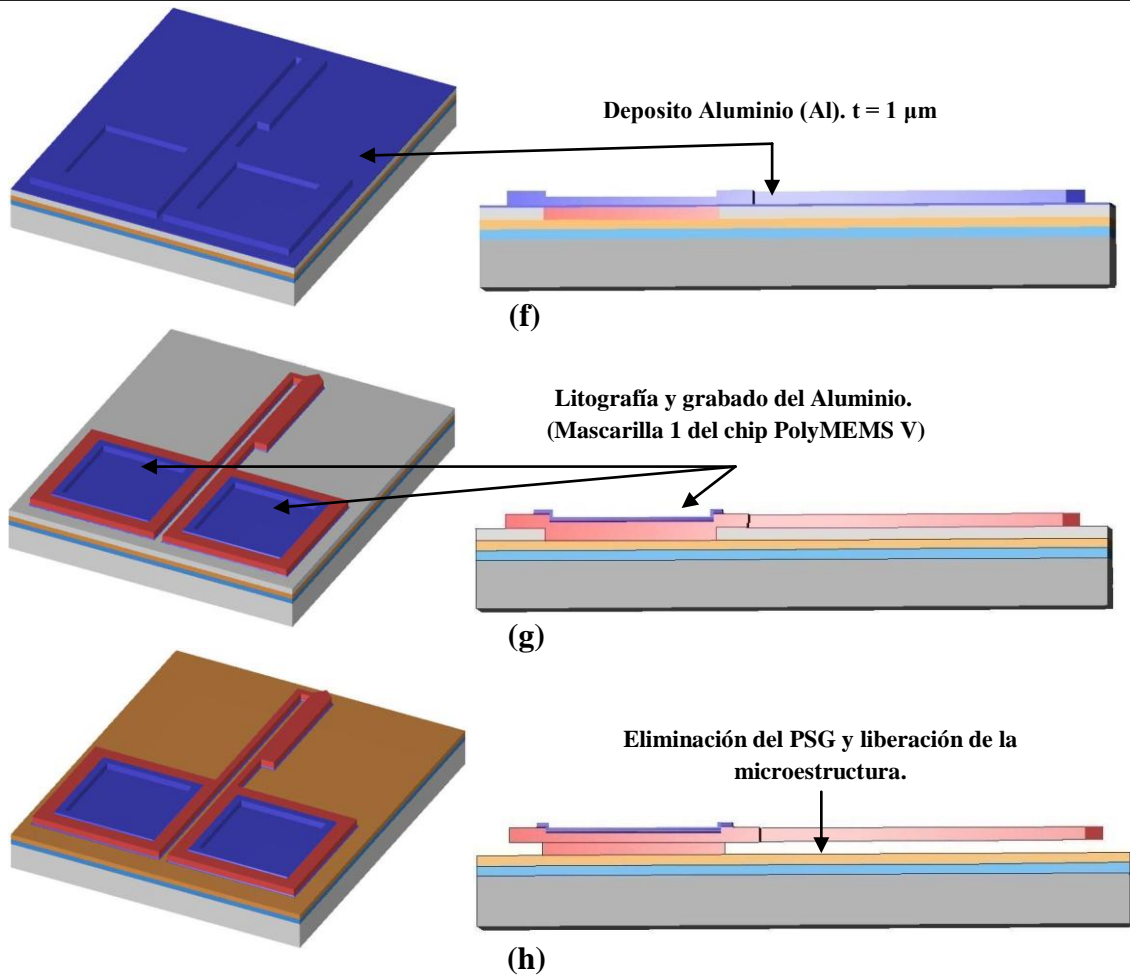


Figura 2. 12 Continuación del proceso de fabricación.

El proceso de fabricación del chip PolyMEMS V, ilustrado en las figuras 2.11 y 2.12, es el siguiente:

1. Obleas de silicio monocristalino son sometidas a limpiezas estándar de desengrasado y limpiezas RCA's.
2. Se crece una película de oxido de silicio de 2000 \AA , que servirá como aislante eléctrico. Figura 2.11 (a) Condiciones: Temperatura = 1000°C , Tiempo = 30min, Flujo: H₂O en vapor.
3. Se deposita una película de polisilicio sin dopar de $0.5\mu\text{m}$, mediante un horno LPCVD. Figura 2.11 (a). Como ya se mencionó, esta película se utiliza como aislante eléctrico en lugar del nitruro de silicio y también, debido a su naturaleza hidrofóbica se utiliza para disminuir las probabilidades de eventos de colapsos en las estructuras durante el proceso

- de liberación. Las condiciones de depósito son: Temperatura = 650°C, Tiempo = 30 min, Flujo y presión SiH₄ (5% en N₂) = 130ss, 1.565 Torr.
4. Se deposita una película de PSG de 2.5µm, mediante un horno APCVD. Figura 2.11 (b). Esta película sirve como soporte temporal del material estructural Poly 2, por lo tanto el PSG es utilizado como material de sacrificio. Las condiciones de depósito son: Temperatura = 450°C, primero se deposita una película delgada de SiO₂ (2000 Å) durante un tiempo = 4 min, Flujos: N₂(2) = 80ss, O₂ = 8ss, SiH₄ = 125ss, en seguida se deposita la película de PSG (2.5µm), durante un tiempo = 58 min, con los mismos flujos anteriormente citados, más el flujo de PH₃= 13ss.
 5. Se realiza el reflujo de PSG en el horno de oxidación inicial, para planarizar la topografía superficial. Las condiciones del depósito son: Temperatura = 1000°C. Tiempo = 30 min en ambiente de H₂O en vapor, se corta el flujo de vapor y se introduce N₂ = 40ss por un tiempo = 20 min. Concluido el depósito, se realiza un decapado de PSG en solución HF 7:1, por un tiempo = 10 seg.
 6. Se utiliza la mascarilla 1 (Figura 2.2.[a]) del chip PolyMEMS V, para realizar la litografía de las bases para el poly-silicio. Es decir, se abren ventanas a través del PSG hasta llegar a la película de poly-silicio sin dopar. Figura 2.11(c). Condiciones de litografía: precalentamiento de obleas por 30 min @ 110 °C, Se aplica resina (negativa) MA-1420 @ 5000 rpm por 30seg; tiempo de exposición = 10 seg. Revelado = 35 seg; Recocido de resina por 15 min @ 110 °C. Realizada la litografía, se graba el PSG con solución 7:1 @ 32 °C. Cabe mencionar que el grabado se realiza por etapas y subsecuente recocido de la resina, según la rutina establecida en el laboratorio de Microelectrónica del INAOE. Al final se retira la resina con acetona por 10 min. Se realizan limpiezas RCA's para la siguiente etapa de fabricación.
 7. Se deposita una película de poly-silicio de 3µm de espesor, mediante un horno LPCVD. Figura 2.12(d). Esta película se utiliza como material estructural (Poly 2). Las condiciones de depósito son iguales a las condiciones descritas en el paso 3, pero con un tiempo = 3 hrs. Inmediatamente, el poly es dopado con fosforo, para obtener polisilicio n⁺. Las condiciones de dopado son: Temperatura = 1000°C, Tiempo = 105 min, Flujos:

- $N_2 = 25\text{ss}$; $O_2 = 10\text{ss}$; $PH_3 = 80\text{ss}$. Posteriormente, se realiza un decapado con solución HF 7:1, para eliminar el vidrio de fosforo que se forma durante el dopado. Es conveniente realizar mediciones de la resistencia de lámina R_s del poly-silicio, para verificar el adecuado dopado. En este trabajo se obtuvieron resistencias de lámina $R_s = 3.7 \pm 0.1 \Omega\text{-}\square$;
8. Se utiliza la mascarilla 2 (Figura 2.2.[b]), para realizar la litografía de poly 2, y definir las microestructuras. Figura 2.12 (e). Condiciones de litografía: precalentamiento de obleas por 15 min @ 110 °C, Se aplica resina (+) MA-1225 @ 3000 rpm por 30seg; pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C; tiempo de exposición = 10 seg; Revelado = 5 seg; Recocido de resina = 25 min @ 135 °C. Realizada la litografía se graba el polisilicio, aplicando las condiciones de grabado seco en RIE que se describen en la sección 2.6. Finalmente se retira la resina con acetona por 10 min. Se realizan limpiezas RCA's para el siguiente procedimiento.
 9. Se deposita una película de Aluminio de 1 μm , mediante el proceso de PVD. Fig. 2.12(f).
 10. Se utiliza nuevamente la mascarilla 1, para realizar la litografía del Aluminio (Metal 1) y definir los contactos eléctricos. Figura 2.11 (g). Condiciones de litografía: precalentamiento de obleas por 15 min @ 110 °C, Se aplica resina (+) MA-1225 @ 5000 rpm por 30seg; pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C; tiempo de exposición = 10 seg. Revelado = 5 seg; Recocido de resina por 20 min @ 110 °C. A continuación, se realiza el grabado del aluminio en solución Al-Etch. Las condiciones del grabado son: Tiempo = 4 min @ 40°C; se realiza un pos-recocido de la resina = 10 min @ 110 °C; tiempo de grabado restante = 5 min @ 40 °C. Posteriormente, se retira la resina por 10 min en acetona.
 11. Se realiza la aleación del aluminio para lograr un buen contacto Óhmico. Las condiciones son: Limpieza en nítrico fumante por 10 min; Aleación por 30 min @ 450 °C; Flujos: $N_2 = 60\text{ss}$; $H_2 = 40 \text{ss}$.
 12. El último paso consiste en la liberación de las microestructuras. Figura 2.11 (f). La técnica utilizada para liberar las microestructuras puede consultarse en la sección 2.7.

2.6. Caracterización del grabado seco en SF₆.

Un paso crítico del proceso de fabricación del chip PolyMEMS V, es el grabado del polisilicio estructural (Poly 2). De acuerdo a procesos anteriores, utilizando el grabado húmedo con KOH al 45%Wt. @ 40°C, se obtiene un perfil de grabado en el polisilicio con un ángulo de inclinación ~54° respecto a la superficie, lo que repercute negativamente en la sección transversal de las microestructuras. Debido a esto, se optó por utilizar la técnica de grabado seco en RIE. La técnica de grabado en seco con plasma RIE, es capaz de generar perfiles anisotrópicos, si las condiciones de presión y potencia son las adecuadas (Alvarez Macías, 2007).

Para caracterizar el proceso de grabado se prepararon muestras con polisilicio dopado con un espesor de 3μm, y se les definió un patrón enmascarante de resina (+) MA-1225; el procedimiento es similar al que se describe en los pasos 1 al 3, 7 y 8 del proceso de fabricación descrito en la sección 2.5. El gas utilizado para generar el plasma RIE, es hexafloruro de azufre SF₆, y el equipo utilizado es el MicroRIE-800 de Technics.

Se realizaron 2 series de pruebas básicas. La primera serie consistió en fijar una potencia eléctrica de 150 Watts y variar la presión base del gas, desde 100 mTorr hasta 300 mTorr, en incrementos de 50mTorr. De esta serie de prueba se obtuvo una razón de grabado vertical satisfactoria que fue de 2300 Å/min, con una rampa de 70±2°, a la presión más baja. Ver Figura 2.13.

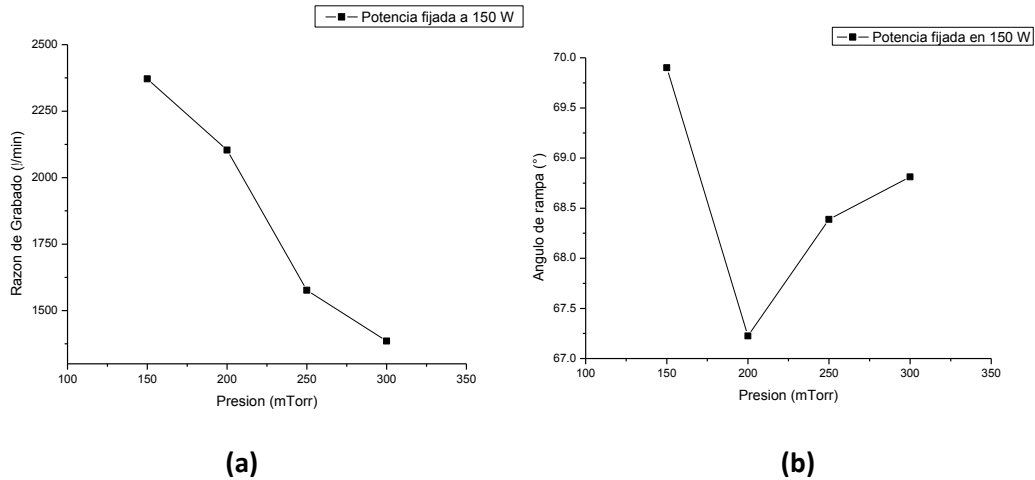


Figura 2. 13 Gráficas obtenidas de la primera prueba de grabado seco en el polisilicio.
a) Grafica de la razón de grabado contra la Presión.
b) Gráfica del ángulo de la rampa obtenida contra la presión.

La segunda prueba consistió en fijar la presión de trabajo óptima obtenida de la prueba anterior, es decir 150 mTorr; y entonces variar la potencia, para observar los resultados en la razón de grabado y en el ángulo de la rampa. De esta prueba, se obtuvo que la mejor razón de grabado fue de 2780 Å/min a 300 Watts, con un ángulo inclinación en la rampa de 68.7°, con respecto a la potencia de trabajo. Ver figura 2.14.

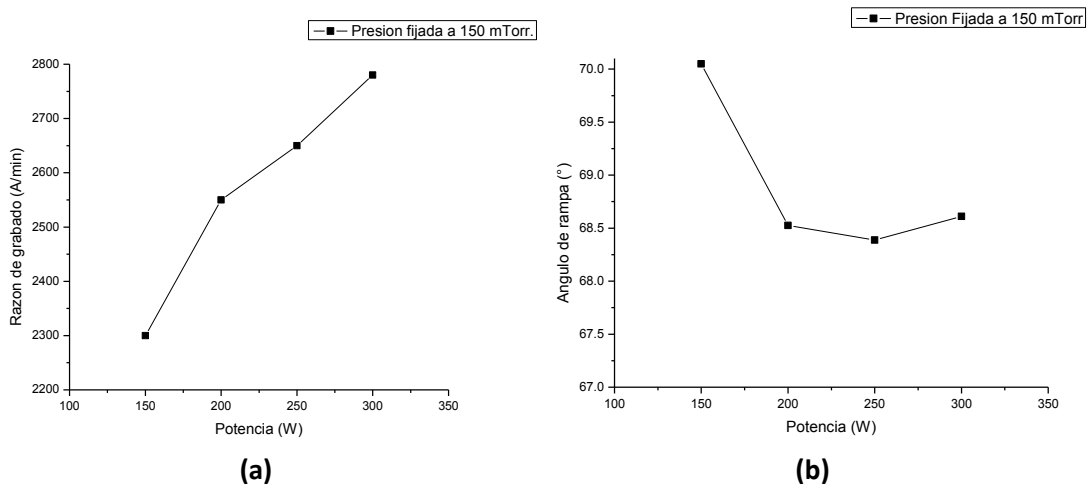


Figura 2. 14 Gráficas de grabado seco obtenidas en la segunda etapa de prueba.
a) Gráfica de la razón grabado contra potencia.
b) Gráfica del ángulo de inclinación obtenido contra la potencia.

Aunque la razón de grabado es mayor que 2300 Å/min obtenida en la primera etapa de prueba, el ángulo de inclinación no es mejor que el obtenido en la primera etapa. Se decidió darle mayor importancia al mayor ángulo de rampa, por lo que se eligieron las siguientes condiciones: Potencia = 150 W; presión SF₆= 150 mTorr; para grabar el polisilicio (Poly 2). La Figura 2.15 muestra una serie de fotografías tomadas con el microscopio SEM (del INAOE), en donde se muestra el perfil de grabado obtenido.

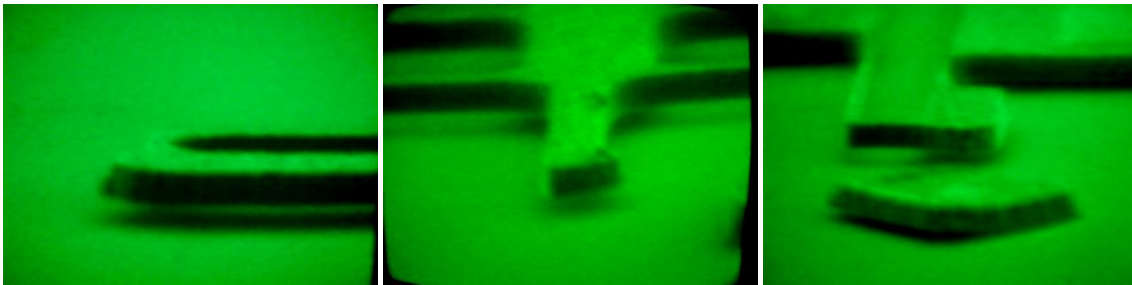


Figura 2. 15 Fotografías ilustrando el perfil de las pistas de polisilicio, utilizando el RIE con plasma de SF₆.

También se hicieron pruebas de grabado en el RIE-ICP del laboratorio de microelectrónica del INAOE, con el fin de obtener una mejor razón y perfil de grabado, utilizando el gas SF₆ y CHF₃. Sin embargo, debido a problemas de funcionamiento en el equipo, no se pudo continuar con la caracterización en este sistema; y por consiguiente, no se obtuvieron resultados significativos.

2.7. Caracterización del proceso de liberación de las estructuras.

Se realizaron distintas pruebas de liberación; La primera de ellas consistió en utilizar fotoresina positiva. Dicho procedimiento involucra el uso de la fotoresina como material de soporte temporal. El procedimiento es el siguiente: una vez eliminada la película de PSG; se procede a sustituir gradualmente el grabante de PSG (solución de HF o RH) por el solvente 2-propanol a 65°C en proporción 1:15 (e.g., 1:15; HF:2-propanol), evitando que la muestra pierda el contacto con el medio líquido y que la solución disipe temperatura; una vez que se ha sustituido completamente el grabante por el solvente, se agrega resina I225 al solvente, mediante un gotero (~15ml), este paso tiene la finalidad de crear “postes temporales” de resina debajo de las estructuras liberadas para evitar su colapso;

posteriormente se evapora el solvente a temperatura ambiente en campana de extracción; y finalmente se eliminan los postes temporales de resina mediante plasma de oxígeno (O_2), utilizando el sistema de grabado seco RIE (Reactive Ion Etching).

La prueba se realizó tal como se describe en muestras preparadas con resina para pasivación de contactos. Un análisis cualitativo demostró que este procedimiento es poco reproducible y sistemático. Debido a que en el final de la prueba (grabado de la resina con RIE), se observaron residuos de resina difíciles de eliminar, aun cuando el tiempo de grabado fuera prolongado (cerca de 60 min de grabado en algunas pruebas). Ver Figura 2.16.

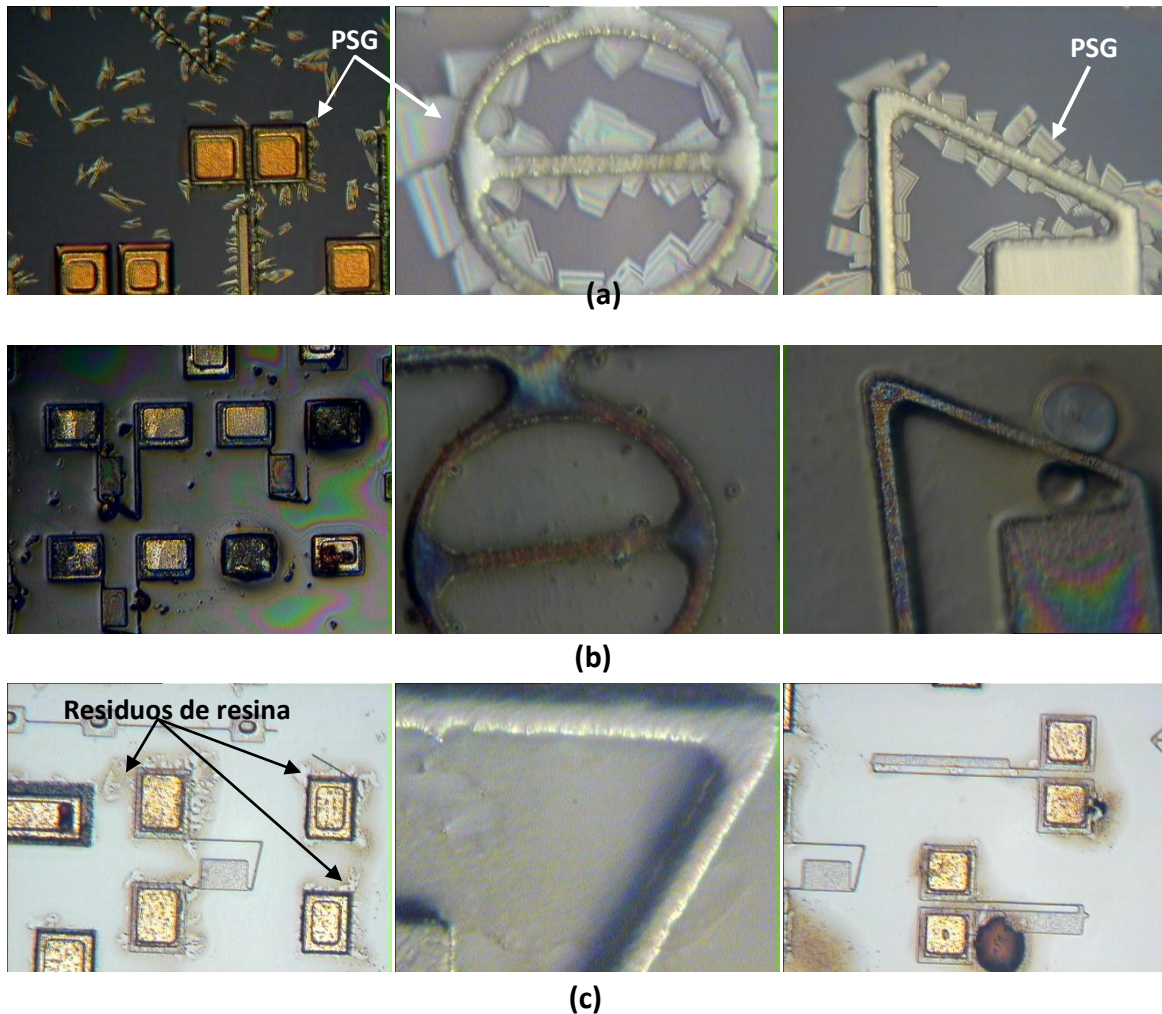


Figura 2. 16 Fotografías que ilustran la prueba de liberación, en donde se utilizó resina como soporte temporal y plasma RIE de O_2 como grabante de la resina. a) Grabado progresivo de PSG con grabante HF. b) Resina agregada después de ser eliminado el PSG. c) Residuos de resina no eliminados después del grabado en RIE.

Otra prueba realizada, consistió en una variante de la prueba anterior. Es decir, se utilizó la resina como soporte temporal y fue grabada también con plasma RIE de oxígeno. La variante consistió en lo siguiente: grabar el PSG, hasta casi lograr la liberación de las estructuras. Es decir, se graba el PSG con el grabante (HF) hasta que prácticamente solo se tengan residuos por debajo de las estructuras. Fig. 12.17(a). Una vez llegado a este punto, se enjuaga la muestra y se deja secar. A continuación, a la muestra se le agrega la resina, mediante centrifugado @ 2000 rev; utilizando una mascarilla litográfica especial, se define un patrón geométrico en forma de rejilla en la resina. Fig. 2.17 (b). La rejilla de resina funciona como soporte temporal de las microestructuras, y sirve como “coladera” dejando penetrar al grabante lateralmente para grabar el PSG que se encuentra por debajo de las estructuras. El siguiente paso es terminar de grabar el PSG remanente, y se procede a enjuagar las muestras con Agua DI. Cabe mencionar que no se usan solventes durante el enjuague, para evitar que la resina sea disuelta; El último paso es grabar la resina con plasma RIE de oxígeno.

Este procedimiento está reportado por (Dai, et al., 1993). Sin embargo, en dicho reporte se plantea un grabado seco por RIE del PSG, antes de grabarlo con HF. El grabado por RIE del PSG no fue posible caracterizarlo en el laboratorio del INAOE debido a algunos problemas técnicos, por lo que se decidió realizar el experimento solamente con grabado húmedo.

Un análisis cualitativo de esta prueba, demostró que este procedimiento es poco reproducible y al igual que la prueba anterior se observaron residuos de resina después del grabado con oxígeno. Figura 12.17 (c).

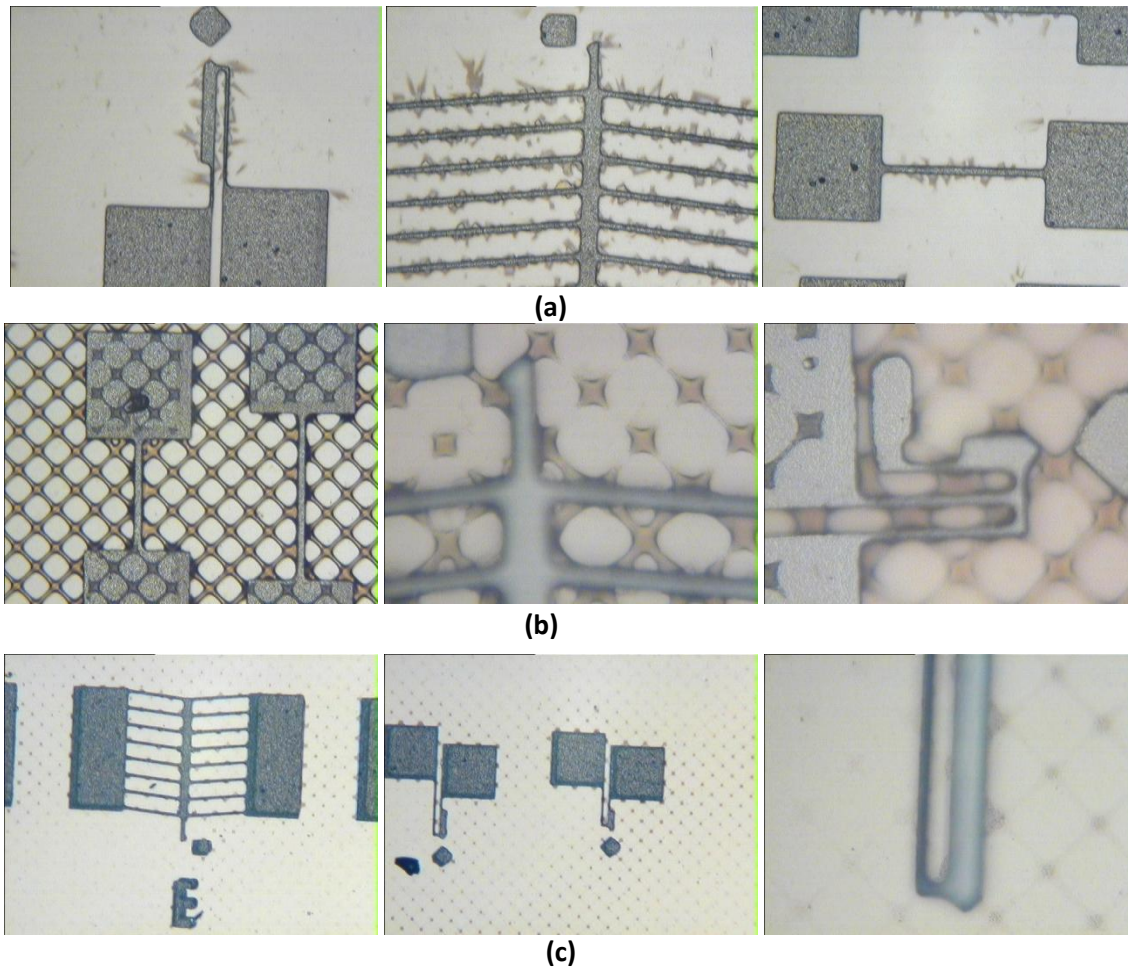


Figura 2. 17 Fotografías que ilustran la 2da prueba de liberación. a) Grabado progresivo del PSG, hasta casi liberar las estructuras. b) Resina aplicada en forma de rejilla. c) Residuos de resina después del grabado con plasma RIE de O_2 .

Debido a que en las pruebas anteriores se observaron residuos y manchas de resina en las obleas, se decidió realizar pruebas de liberación en solución acuosa, ensayando enjuagues y distintos procedimientos de secado de las muestras, que al final presentaron resultados satisfactorios. El procedimiento para la liberación de las estructuras, que demostró resultados satisfactorios, se describe a continuación:

1. Se tomó una oblea con estructuras listas para liberar, y se le realizó la litografía de pasivación, utilizando la mascarilla 1. Esta litografía tiene por objetivo proteger los contactos de Aluminio del grabante de PSG. Condiciones de litografía: precalentamiento de obleas por 15 min @ 110 °C, Se aplica resina (+) MA-1225 @ 5000 rpm por 30seg;

pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C; tiempo de exposición = 10 seg. Revelado = 5 seg; Recocido de resina por 15 min @ 110 °C.

2. La oblea fue cortada en 4 partes iguales, enseguida se colocó una de ellas en posición vertical dentro de un embudo de separación, resistente al HF.
3. Se vierte ácido fluorhídrico HF al 49%, dentro del embudo hasta que se remoje totalmente la muestra, durante 4 min. El tiempo total de grabado del PSG se calcula de la siguiente manera:

La dimensión L más grande para liberar lateralmente es de 20 μm . Se toma en cuenta que el grabante penetra en todas direcciones, por lo tanto la dimensión real a liberar es $L = 20\mu\text{m}/2 = 10\mu\text{m}$. El grosor de la película de PSG es $\sim 2.5 \mu\text{m}$. La razón de grabado lateral del HF al 49% es $\sim 4 \mu\text{m}$. Por lo tanto, el tiempo total t es: $t = \frac{10\mu\text{m}}{4 \mu\text{m}} + \frac{2.5\mu\text{m}}{4 \mu\text{m}} \cong 4 \text{ min.}$

4. Transcurrido el tiempo, agregar 2 propanol @ 62°C; y eliminar el HF con ayuda del embudo de separación, sin que la muestra deje de estar inmersa en el líquido.
5. Agregar Agua DI @ 62 °C; y eliminar el 2 propanol, sin que la muestra deje de estar inmersa en el líquido.
6. Agregar Acetona @ 62 °C; y eliminar el Agua DI, sin que la muestra deje de estar inmersa en el líquido.
7. Agregar Agua DI @ 62 °C; y eliminar la Acetona, sin que la muestra deje de estar inmersa en el líquido.
8. Agregar 2 propanol @ 62 °C; y eliminar el Agua DI, sin que la muestra deje de estar inmersa en el líquido.
9. Sin retirar la muestra del 2 propanol, se introduce en el horno @ 120 °C, hasta evaporar todo el solvente. Una vez evaporado el solvente, las muestras han quedado liberadas.
10. Verificar las muestras bajo el microscopio óptico o SEM, para asegurarse que las estructuras fueron liberadas satisfactoriamente.

Los resultados obtenidos con este método fueron exitosos y se observó la liberación sistemática de las microestructuras en todas las muestras. La Figura 2.18 muestra una serie de fotos tomadas con el microscopio SEM del INAOE, en donde se observan estructuras TBA y TMV liberadas, de $200\mu\text{m}$ y $418\mu\text{m}$ de longitud, respectivamente. La separación entre las microestructuras y el substrato es de $2.5\pm 0.2\ \mu\text{m}$.

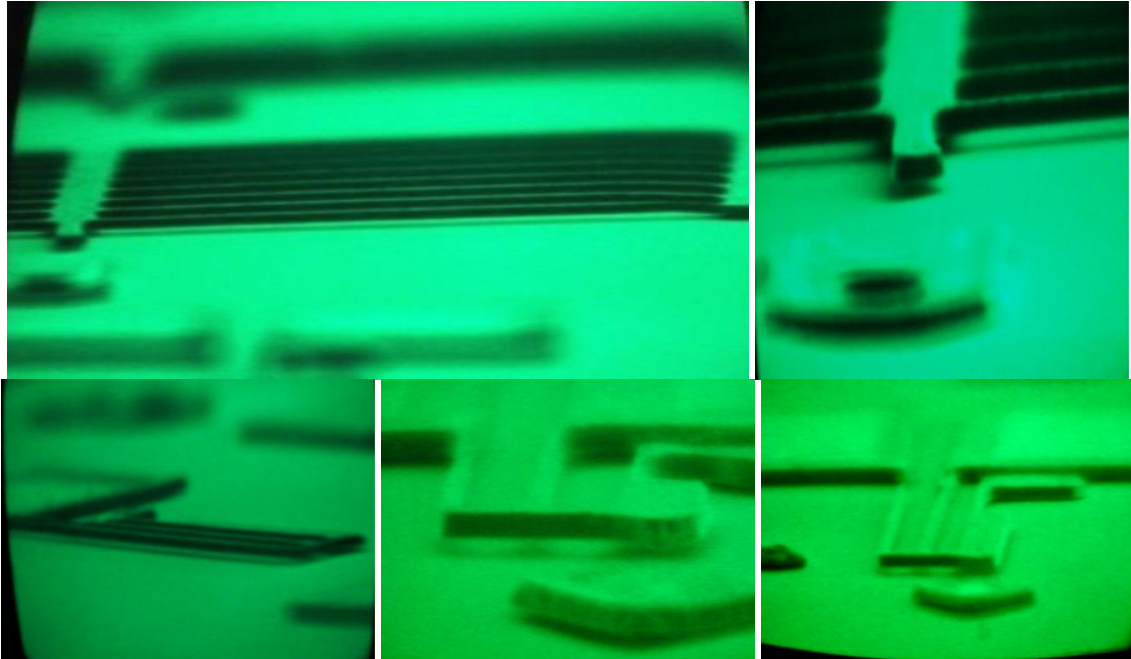


Figura 2. 18 Fotografías correspondientes a microestructuras TBA y TMV suspendidas.

2.8. Resumen.

En este capítulo se realizó una revisión sobre el diseño del chip PolyMEMS V. Se tomaron en cuenta las reglas de diseño establecidas en el proceso PolyMEMS-INAOE, para el diseño del Layout del Chip PolyMEMS V. El diseño utiliza solamente 2 mascarillas para definir 4 niveles de fabricación: Base poly 2, Estructuras Poly 2, Metal 1 y Pasivación.

Por otra parte, el ancho de pista mínimo utilizado es de $5\mu\text{m}$. El grosor de polisilicio estructural (Poly 2) fue incrementado de $2\mu\text{m}$ (proceso PolyMEMS-INAOE) a $3\mu\text{m}$; para logra una razón de aspecto de $5/3$, que permita lograr desplazamientos horizontales (paralelos) al substrato. Los monitores de esfuerzo mecánico se redimensionaron tomando en cuenta los resultados obtenidos por (Alanís Navarro, 2008), para mejorar la precisión en las mediciones de los esfuerzos residuales mecánicos intrínsecos. La longitud máxima establecida para las microestructuras TBA es de $200\mu\text{m}$, y para la microestructura TMV es de $418\mu\text{m}$, proyectando que con estas dimensiones no ocurrirá colapso durante la liberación.

De igual manera, se presentó el proceso de fabricación completo del chip PolyMEMS V, el cual fue mejorado respecto al proceso PolyMEMS-INAOE; Las mejoras principales son: Se ensayó una etapa de grabado seco para el polisilicio estructural (Poly 2, grosor = $3\mu\text{m}$), donde se lograron perfiles más verticales, con una rampa de 70° . Se sustituyó el nitruro de silicio por polisilicio sin dopar (Poly 1, grosor = $0.5\mu\text{m}$), que permite una liberación húmeda más eficaz, ya que por su característica hidrofóbica reduce la tensión superficial de los líquidos utilizados en los enjuagues; lo que disminuye la probabilidad de que se presenten eventos de colapsos.

También, se presentó un proceso nuevo de liberación húmedo, utilizando: Agua DI, Acetona y 2-propanol, que produjo sistemáticamente estructuras suspendidas sin evidente riesgo de colapso.

Referencias.

Alanís Navarro, José Andrés. 2008. *Desarrollo del proceso de fabricación PolyMEMS-INAOE.* Puebla, México : s.n., 2008. Tesis.

Alvarez Macías, Carlos. 2007. *Micromaquinado de silicio monocristalino mediante grabado seco.* Puebla : INAOE, 2007.

Cragun, Rebecca and L. Howell, Larry. 1999. *Linear thermomechanical microactuators.* s.l. : ASME, 1999. Vol. 1.

Dai, Cobayashi, Chang-Jin, Kim and Hirojuki, Fujita. 1993. *Photoresist-Assisted Release of Movable Microestructures.* s.l. : Jpn. J Appl. Phys., 1993. pp. 1642-1644. Vol. 32.

Díaz Alonzo, Daniela. 2008. *Estudio de los mecanismos de colapso en microactuadores y su influencia en microsistemas.* BUAP. Puebla, México : s.n., 2008.

Korvink, Jan G. and Paul, Oliver. 2006. *MEMS a practical guide to desing, analysis and applications.* USA : Springer, 2006. p. 752.

Pelesko, John A. and Bernstein, David H. 2003. *Modeling MEMS nad NEMS.* USA : Chapman & Hall/CRC, 2003. Vol. 1.

Quin An, Huang and Neville Ka, Shek Lee. 2000. *A simple approach to characterizing the driving force of polysilicon laterally driven thermal microactuators.* [ed.] Sensors and actuators. 2000. Vol. A.

R. Mutikainen, M. Orpana. 1993. *Silicon Surface Micromachined Structures for the Stress Measurement of Thin Films.* s.l. : Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 308, 1993. págs. 153-158.

Van Driehuisen, B.P., Goosen, J.F.L. and Wolffenbuttel, R.F. 1993. *Comparison of techniques for measuring compressive and tensile stress in thin films.* s.l. : Sensors and Actuators A, 1993. pp. 756-765.

Yan, Dong. 2002. *Mechanicals desing and modeling of MEMS thermal actuators for RF applications.* University of Waterloo. Waterloo, Ontario : s.n., 2002. Tesis.

Youngjun, Lai, et al. 2004. *Force, deflection and power masurements of toggle microthermal actuators.* s.l. : Journal of micromechanics and microengineering, 2004. pp. 49-56. Vol. 14.

Capítulo 3.

Resultados Experimentales.

3.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización eléctrica y mecánica realizada a las estructuras. Para estimular las muestras eléctricamente se utilizó una fuente Keithley 2400 capaz de suministrar corrientes de 50pA a 1.05A; medir corrientes de 10pA a 1.055 A; suministrar voltajes 5μV a 210V; y mide voltajes de 1μV a 211V. Las observaciones ópticas se realizaron con un microscopio orto plano óptico, con magnificaciones de 5x, 20x, 50x y 100x.

Se eligieron 3 microestructuras tipo puente, para medir su resistencia y de esta forma verificar el tipo de contacto después de la aleación de los contactos eléctricos (Aluminio-Poly). También, se eligieron 7 micro-estructuras electro térmicas para caracterizarlas eléctricamente; de las cuales, se escogieron 4 micro estructuras TBA: A1, A2, A3 y A4 que corresponden a las microestructuras TBA de mayor longitud (200 μm); así mismo, se eligieron 3 microestructuras TMV: A1, A2 y A3 que también son las estructuras de mayor longitud (418μm). La caracterización eléctrica de las microestructuras consistió en obtener curvas de corriente contra voltaje (I-V), mediante un barrido de voltaje de -3 a 3 volts. Figura 1.3.

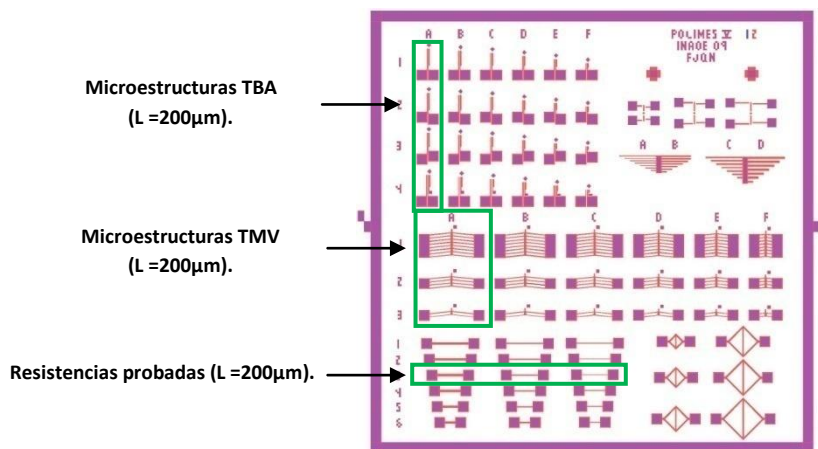


Figura 3. 1 Estructuras elegidas para mediciones eléctricas.

La figura 3.2 muestra la fotografía tomada con microscopio SEM del Chip PolyMEMS V; fabricado en el laboratorio de microelectrónica del INAOE, con un ancho de pista mínimo de $5\mu\text{m}$, mediante el proceso de fabricación modificado PolyMEMS-INAOE. El Chip tiene una dimensión de $4\times 4\text{mm}$.

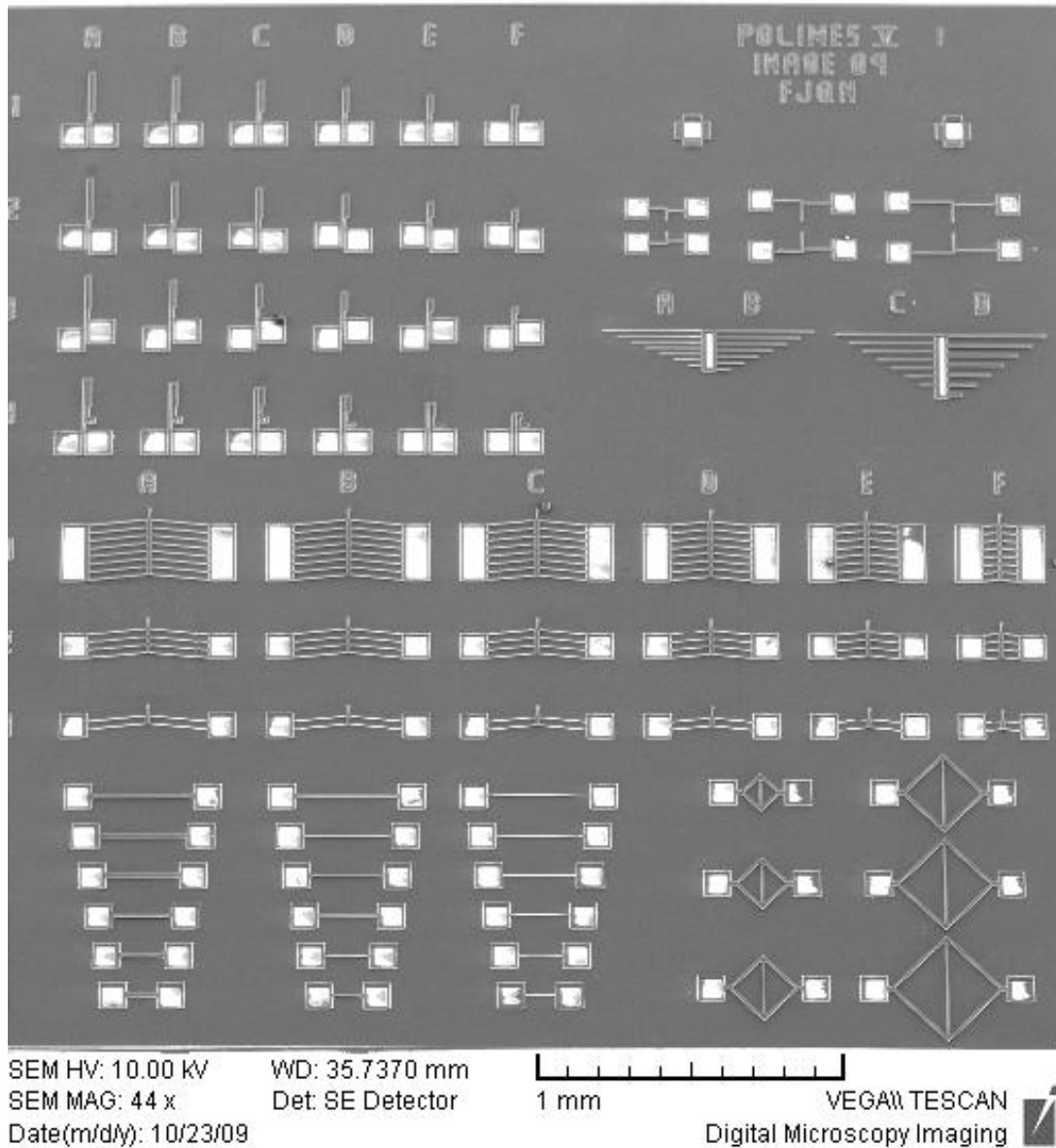


Figura 3. 2 Fotografía tomada con microscopio SEM del Chip PolyMEMS V;
Dimension del chip: $4\times 4\text{mm}$.

3.1. Caracterización eléctrica.

A continuación se muestran los resultados de la caracterización eléctrica de las microestructuras Joule. Primero, se verificó que los contactos eléctricos de los pads aluminio/poly, presenten un contacto óhmico, es decir, que los contactos eléctricos de las microestructuras tengan un buen contacto. Para ello, se realizó un barrido de -3 a 3 volts, para trazar las curvas Corriente-Voltaje (I-V). Como se mencionó anteriormente, se eligieron 3 estructuras tipo puente A3, B3 y C3 (longitud 200 μm), ver Figura 3.1. Las mediciones se realizaron sistemáticamente sobre 5 dados en distintas obleas de una misma corrida. En la Figura 3.3. Se muestran las curvas I-V de cada estructura, y en cada gráfica se presenta 5 curvas representativas de las mediciones realizadas.

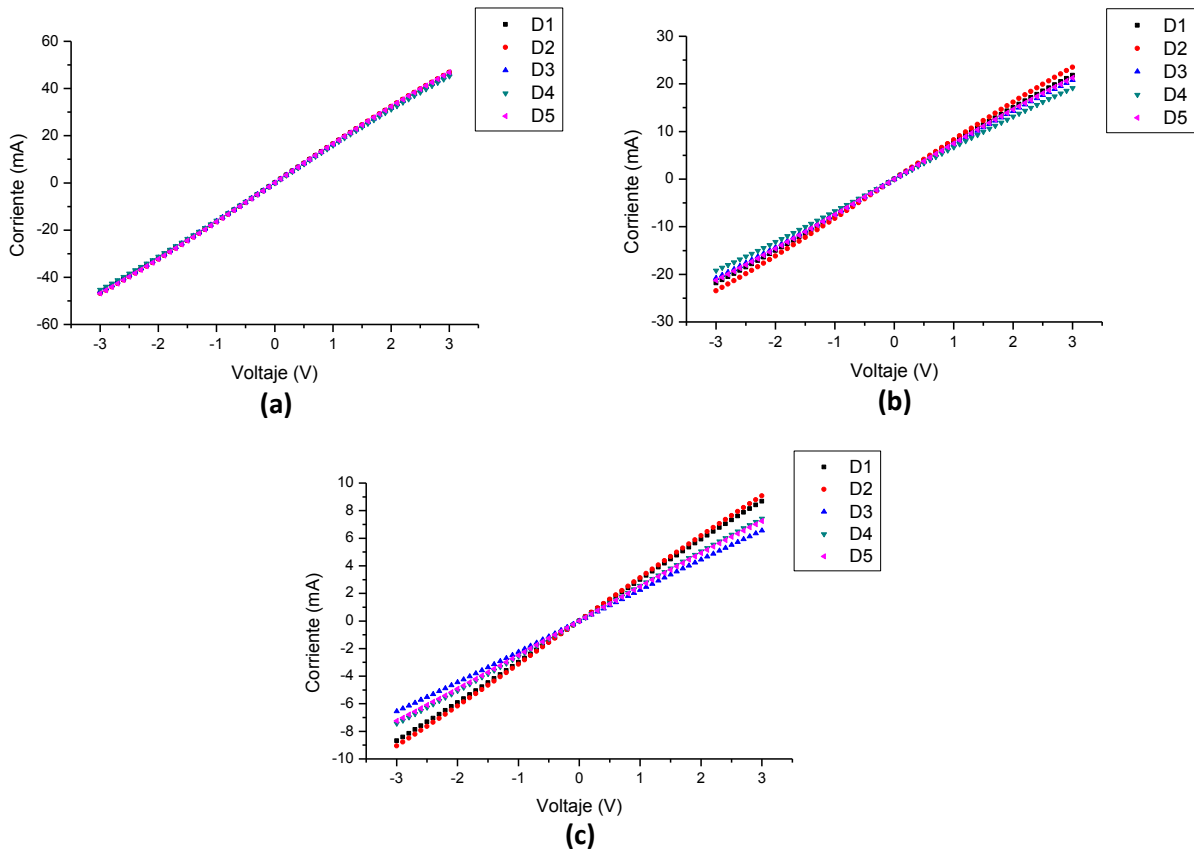


Figura 3. 3 Graficas de I-V de las estructuras tipo puente con una longitud 200 m.
a) RA1, con un ancho de 20 μm . b) RA2, con ancho de 10 μm . c) RA3, con ancho de 5 μm .

En cada grafica se aprecia un comportamiento lineal de las curvas de I-V, este análisis cualitativo asegura que en los contactos eléctricos de las microestructuras se tiene un adecuado contacto óhmico con baja resistencia. La figura 3.3 (a) corresponde a las mediciones de la estructura puente A3 de 20µm de ancho, la figura 3.3 (b) corresponde a las mediciones de la estructura B3 de 10µm de ancho y la figura 3.3 (c) corresponde a las mediciones de la estructura C3 de 5µm de ancho. Las tres estructuras tienen 200µm de largo, por 3µm de espesor. En la segunda columna de la tabla 3.1 se muestra la resistencia esperada de cada estructura, calculada mediante la ecuación 3.1.

$$R = \frac{\rho_e}{h} \left(\frac{l}{w} \right) \quad 3.1$$

Donde l es la longitud, w el ancho, h el espesor de cada trampolín y ρ_e es la resistividad del polisilicio. La resistencia laminar del polisilicio medida en el laboratorio es $R_s = 3.7 \pm 0.1 \Omega\text{-}\square$; Consecuentemente, la resistividad del polisilicio fue calculada en $\rho_e = 0.001 \pm 0.0001 \Omega\text{-cm}$. La cuarta columna de la tabla 3.1 muestra la resistencia medida en cada estructura, obtenidas de la pendiente de cada curva I-V de la figura 3.2.

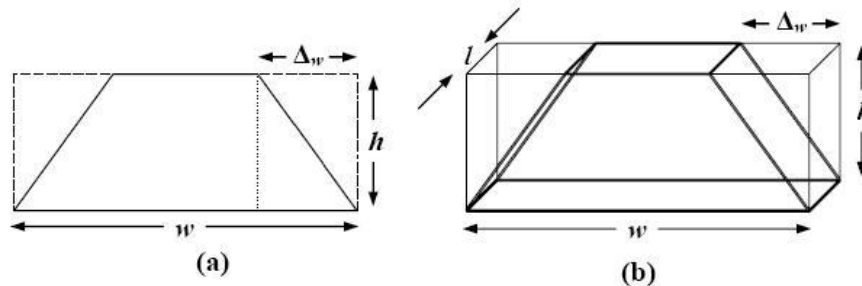


Figura 3. 4 Representación grafica de la disminución de volumen en una estructura (Alanís Navarro, 2008).
a) Corte transversal del área. b) Representación tridimensional de la estructura.

Como se mencionó en la sección 2.6, el grabado seco del polisilicio produjo paredes con una rampa de $70 \pm 3^\circ$ con respecto a la horizontal, esto repercute en el volumen real de las estructuras ya que disminuye y provoca que la resistencia eléctrica efectiva se incremente. Por lo tanto, es necesario ajustar la resistencia calculada para obtener una mejor aproximación a la resistencia real, ocasionada por la reducción de las dimensiones durante la fabricación, ver Figura 3.4.

La resistencia ajustada se puede calcular tomando en cuenta la reducción del área efectiva transversal, mediante la ecuación 3.2 (Alanís Navarro, 2008).

$$R = \frac{\rho_e}{h} \left(\frac{l}{w - \Delta w} \right) \quad (3.2)$$

Donde Δw es el decremento de w en la base superior, Figura 3.4. Las mediciones ópticas realizadas a las microestructuras puente mostraron que: $\Delta w = 1 \pm 20\% \mu\text{m}$; y que las dimensiones w en las estructuras A3, B3 y C3, se redujeron a: $w_{A3} = 15 \pm 1.5 \mu\text{m}$; $w_{B3} = 8 \pm 0.7 \mu\text{m}$; $w_{C3} = 3.5 \pm 0.3 \mu\text{m}$. En la tercera y cuarta columna de la tabla 3.1, se muestra la resistencia calculada ajustada y la resistencia eléctrica medida, respectivamente.

Tabla 3. 1 Valores de las resistencias, para las microestructuras tipo puente.

	Resistencia Calculada (Ω)	Resistencia Calculada Ajustada (Ω)	Resistencia Medida (Ω)
A3	37	59±10%	62 ± 2%
B3	74	122±11%	135 ± 4%
C3	147	367±12%	369 ± 5%

Como se observa en la tabla 3.1 los valores de las resistencias calculadas ajustadas se aproximan en un 90% a las resistencias medidas, lo cual indica una tolerancia aceptable del 10%. Además, se observa que $RC3 \approx 4 \cdot RA3$, $RC3 \approx 2 \cdot RB3$, ya que $w_{C3} \approx 3 \cdot w_{A3}$, $w_{C3} \approx 2 \cdot w_{B3}$, lo cual se comprueba en los valores obtenidos que se muestran en la Tabla 3.1.

Es importante mencionar que los cálculos en la resistencia calculada ajustada demostraron que, conforme las dimensiones se hacen menos reducidas y se acercan a Δw , una pequeña variación en el ancho w de la estructura, provoca que la pendiente en la gráfica I-V cambie fuertemente; es decir, que la variación de la resistencia es más evidente en estructuras con dimensiones cercanas a Δw ; lo cual se puede observar en las graficas de las curvas I-V mostradas en la figura 3.3. Es importante mencionar que estas variaciones también hacen que el error en la resistencia calculada se incremente, por la diferencia absoluta de la magnitud de la pendiente entre una curva y otra.

3.1.1. Voltajes y corrientes de polarización de micro actuadores TBA.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas a las microestructuras TBA seleccionadas, ver Figura 3.1. Como se mencionó al principio de este capítulo, la caracterización consistió en trazar las curvas I-V, para conocer el comportamiento real de los dispositivos. De estas curvas, se obtuvieron: la resistencia medida, calculada y ajustada, utilizando la ecuación 1.3 y la ecuación 1.4, ver tabla 3.3. Para calcular la resistencia calculada ajustada, w_j debe ser modificada por $w_j - \Delta w$, tal y como se explica en la sección 3.1.

Respecto a las microestructuras A1, A2, A3 y A4, las dimensiones w_j medidas en el microscopio óptico, se muestran en la Tabla 3.2. Utilizando estas dimensiones se calcula la resistencia calculada ajustada, teniendo en cuenta que $\Delta w = 1 \pm 20\% \mu\text{m}$.

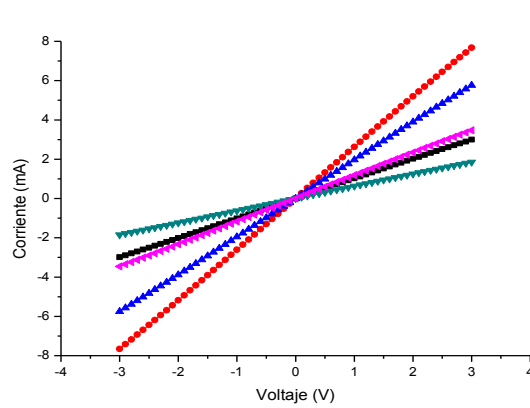
Tabla 3. 2 Dimensiones medidas en microscopio (mag 100X) de las estructuras TBA.
(Las dimensiones de w_c y w_f para la estructura TBA_A4 no se utilizan).

Dimensiones medidas (μm)				
Estructura	w_h	w_g	w_c	w_f
A1	3.3±23%	3.3±23%	12.4±4%	3.4±24%
A2	3.2±20%	3.2±20%	12.4±4%	3.4±20%
A3	3.2±20%	3.2±20%	12.1±3%	3.6±13%
A4	4±15%	4±15%	-	-

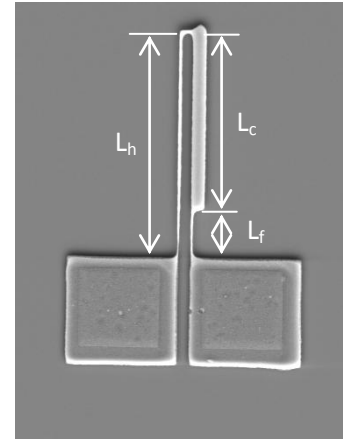
En las figuras: 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 se presentan las gráficas de las curvas I-V, junto con una fotografía ilustrativa tomada con un microscopio SEM de la estructura TBA correspondiente. En cada gráfica se presenta 5 curvas representativas de las mediciones realizadas sistemáticamente a 5 dados en varias obleas. Los valores de la resistencia calculada, medida y ajustada, se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3 Valores de las resistencias para las microestructuras TBA.

	Resistencia Calculada (Ω)	Resistencia Calculada Ajustada (Ω)	Resistencia Medida (Ω)
A1	220	672 ± 20	$679 \pm 15\%$
A2	205	$613 \pm 19\%$	$615 \pm 18\%$
A3	212	$633 \pm 16\%$	$642 \pm 16\%$
A4	299	$707 \pm 18\%$	$706 \pm 18\%$

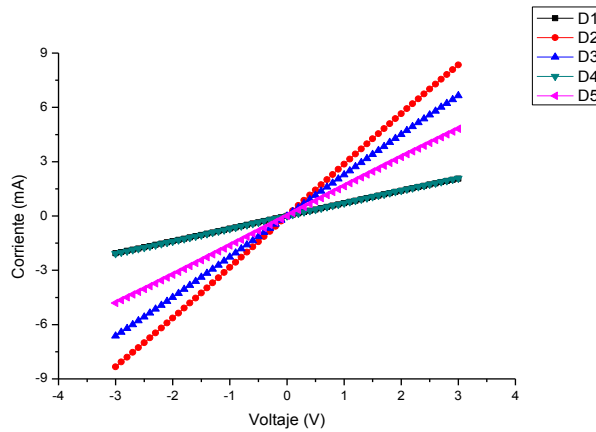


(a)

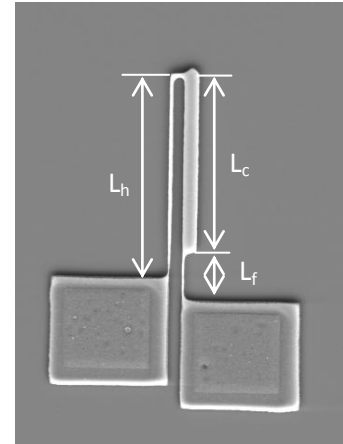


(b)

Figura 3. 5 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A1.
b) Fotografía del microscopio SEM del TBA-A1,
 $L_h = 200\mu\text{m}$, $L_c = 162\mu\text{m}$ y $L_f = 38\mu\text{m}$.



(a)



(b)

Figura 3. 6 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A2.
b) Fotografía del microscopio SEM del TBA-A2.
 $L_h = 180\mu\text{m}$, $L_c = 162\mu\text{m}$ y $L_f = 38\mu\text{m}$.

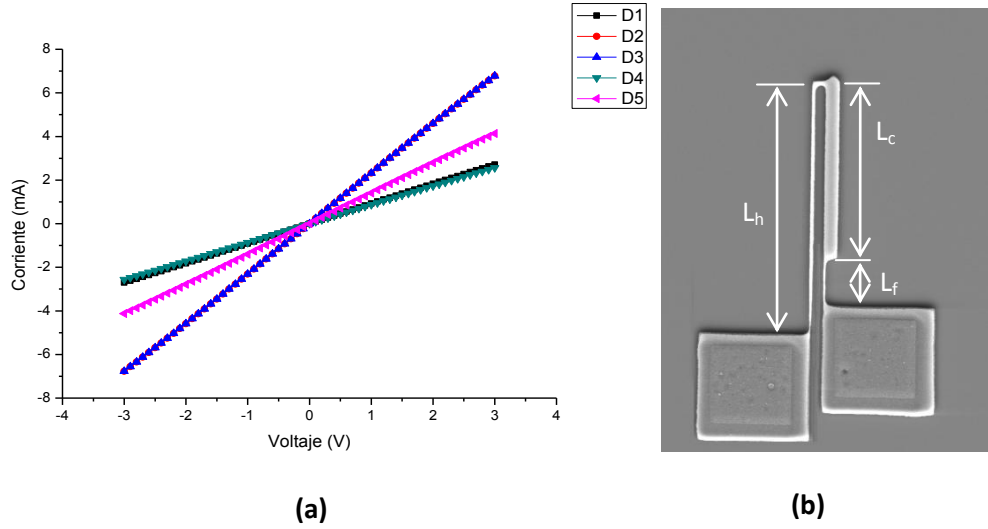


Figura 3. 7 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A3.
b) Fotografía del microscopio SEM del TBA-A3.
 $L_h = 200\mu\text{m}$, $L_c = 132\mu\text{m}$ y $L_f = 38\mu\text{m}$.

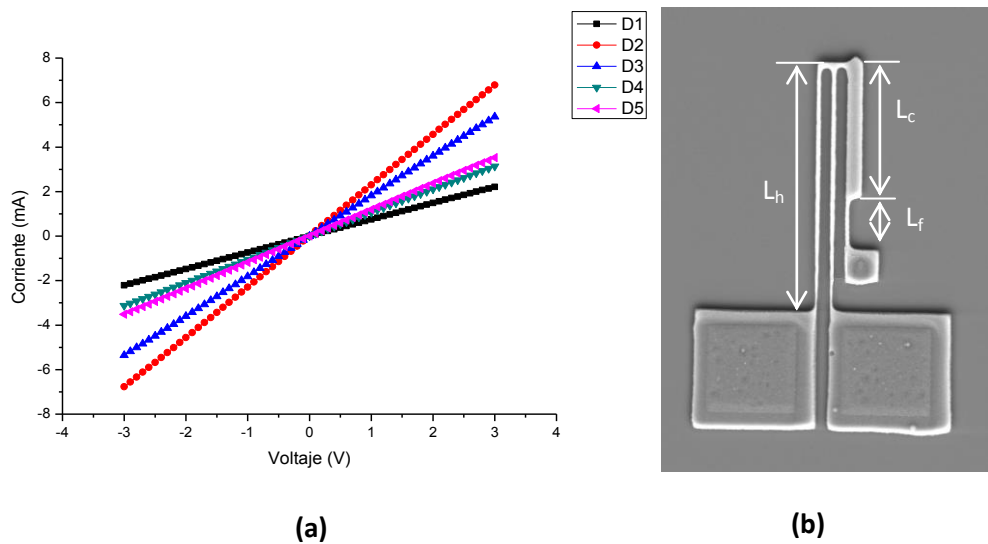


Figura 3. 8 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A4.
b) Fotografía del microscopio SEM del TBA-A4.
 $L_h = 200\mu\text{m}$, $L_c = 132\mu\text{m}$ y $L_f = 38\mu\text{m}$.

Al inspeccionar la gráfica (a) del TBA-A1 de la figura 3.5, se observa que la pendiente en cada curva cambia, y se puede notar que las mediciones de corriente oscilan de entre 2 y 6mA. Estos cambios de pendiente en la curva de corriente entre una estructura y otra, se debe principalmente a la variación en la resistencia eléctrica de cada estructura. El cambio en la resistencia eléctrica está relacionado con la variación en las dimensiones w_j en cada microestructura, como se explica en la sección 3.1.

Como se observa en la fila 1 de la tabla 3.2 correspondiente a la estructura TBA-A1, los valores de w_h , w_f y w_g son comparables o cercanos al valor de $\Delta w = 1 \pm 20\% \mu\text{m}$, y como se mencionó anteriormente una variación pequeña en el ancho w_j de la estructura, provocara que la pendiente de la curva I-V cambie fuertemente; Si la variación en la dimensión de las microestructuras no existiera entonces el valor de la resistencia que se midiera en cada estructura seria uniforme y dentro de un valor específico. Lo que provocaría que las pendientes en la grafica de la figura 3.5 (a) se observaran agrupadas y no dispersas. Dicha dispersión en la gráfica se puede predecir directamente al observar el valor del error promedio en las dimensiones w_j presentadas en la tabla 3.2, ya que si el valor del error es muy grande ($>10\%$), indica que el conjunto de datos medidos (dimensiones) varía mucho y por consiguiente se obtendrán curvas I-V dispersas o con pendientes distintas. Por el contrario, si el error es pequeño ($\leq 10\%$), esto es indicio de que el conjunto de datos medidos, se encuentran agrupados alrededor de un valor específico y que por consiguiente se obtendrán gráficas de curvas I-V agrupadas.

Por otra parte, este efecto dispersión de las curvas I-V se puede observar en todas las graficas presentadas en esta sección y el comportamiento coincide precisamente con los valores grandes reflejados en los errores calculados para cada dimensión de la tabla 3.2.

El hecho de encontrar dispersión o variación en las dimensiones de las estructuras indican que durante la fabricación, específicamente en el paso de litografía para definir geometrías de $5\mu\text{m}$ (dimensión cercana a $\Delta w = 1\mu\text{m}$) y por consiguiente el paso del grabado de dichas geometrías no fue del todo uniforme, en todas las obleas ni en una sola oblea. Por lo tanto estos pasos de fabricación son críticos y deben ser bien controlados para obtener mejores características eléctricas.

3.1.2. Voltajes y corrientes de polarización de micro actuadores Chevron.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas a las microestructuras TMV, ver Figura 3.1. Se realizó el mismo tipo de prueba, tal como se describe en la sección anterior. También, se obtuvieron: la resistencia medida, calculada y ajustada, utilizando la ecuación 1.5. Ver tabla 3.5. Cabe mencionar que también se realiza el cambio de w_j , por $w_j - \Delta w$, tal como se explica en la sección 3.1.

Las dimensiones w_j correspondientes a las microestructuras A1, A2 y A3, medidas con el microscopio óptico en 5 dados de distintas obleas de una misma corrida, se muestran en la Tabla 3.4. Utilizando estas dimensiones se calcula la resistencia ajustada. También se midió Δw , el decremento en la base superior de la microestructura, resultando: $\Delta w = 1 \pm 20\% \mu\text{m}$;

Tabla 3. 4 Dimensiones medidas en microscopio (mag 100X) de las estructuras TMV.

Dimensiones medidas (μm)	
Estructura	w_h
A1	$5.1 \pm 7\%$
A2	$4.3 \pm 8\%$
A3	$3.1 \pm 17\%$

Tabla 3. 5 Magnitudes de las resistencias para las microestructuras TMV.

	Resistencia Calculada (Ω)	Resistencia Calculada Ajustada (Ω)	Resistencia Medida (Ω)
A1	26	$50 \pm 11\%$	$53 \pm 10\%$
A2	61	$133 \pm 19\%$	$140 \pm 11\%$
A3	147	$465 \pm 25\%$	$487 \pm 15\%$

En las figuras: 3.9, 3.10 y 3.11 se presentan las gráficas de las curvas I-V, junto con una fotografía ilustrativa tomada con un microscopio SEM de la estructura TMV correspondiente. En cada gráfica se presenta 5 curvas representativas de las mediciones realizadas sistemáticamente a 5 dados en varias obleas.

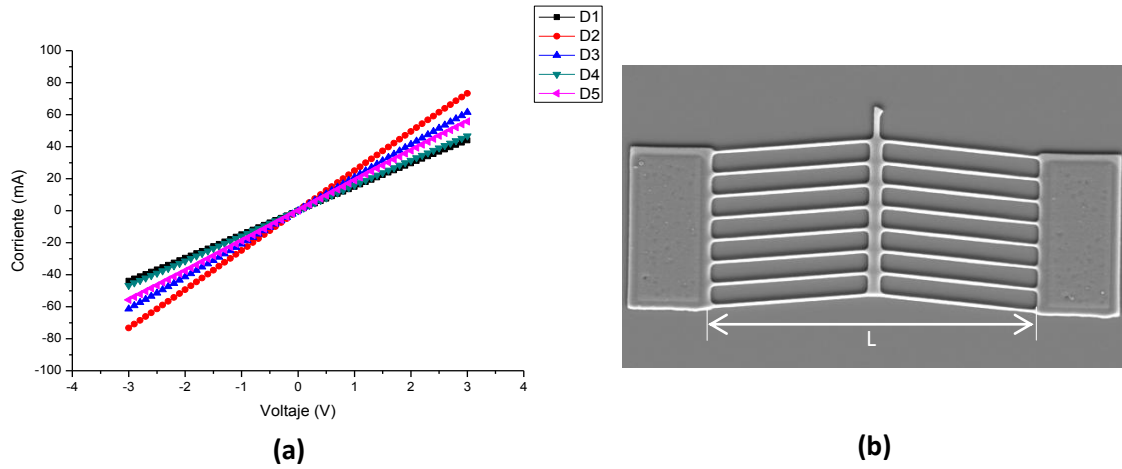


Figura 3. 9 a) Gráfica de la curva I-V del TMV-A1.
b) Fotografía del microscopio SEM del TMV-A1; 8 pares de brazos, $L = 418\mu\text{m}$.

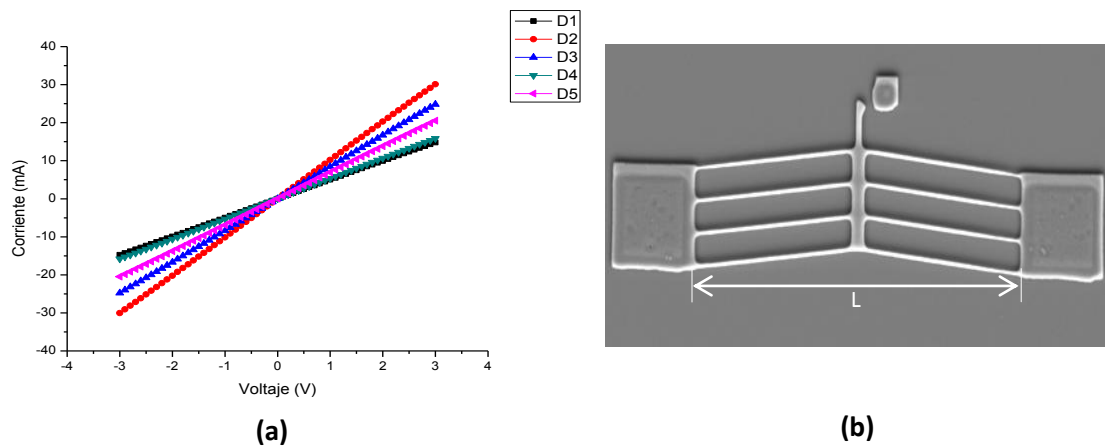


Figura 3. 10 a) Gráfica de la curva I-V del TMV-A2.
b) Fotografía del microscopio SEM del TMV-A2; 4 pares de brazos, $L = 418\mu\text{m}$.

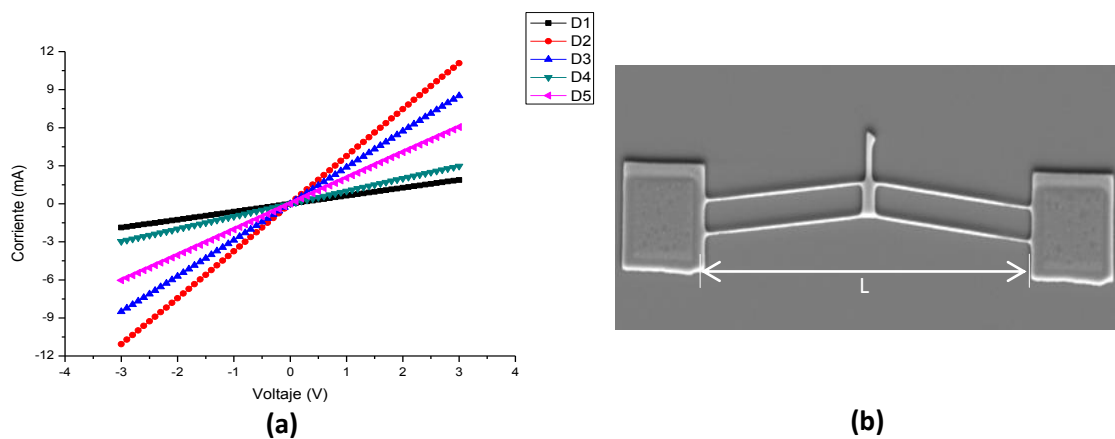


Figura 3. 11 a) Gráfica de la curva I-V del TMV-A3.
b) Fotografía del microscopio SEM del TMV-A3; 2 pares de brazos, $L = 418\mu\text{m}$.

Nuevamente en las graficas de las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se observa un comportamiento similar al analizado en la sección 3.1.1, por lo que no será necesario precisar mas detalles.

3.2. Esfuerzos mecánicos internos.

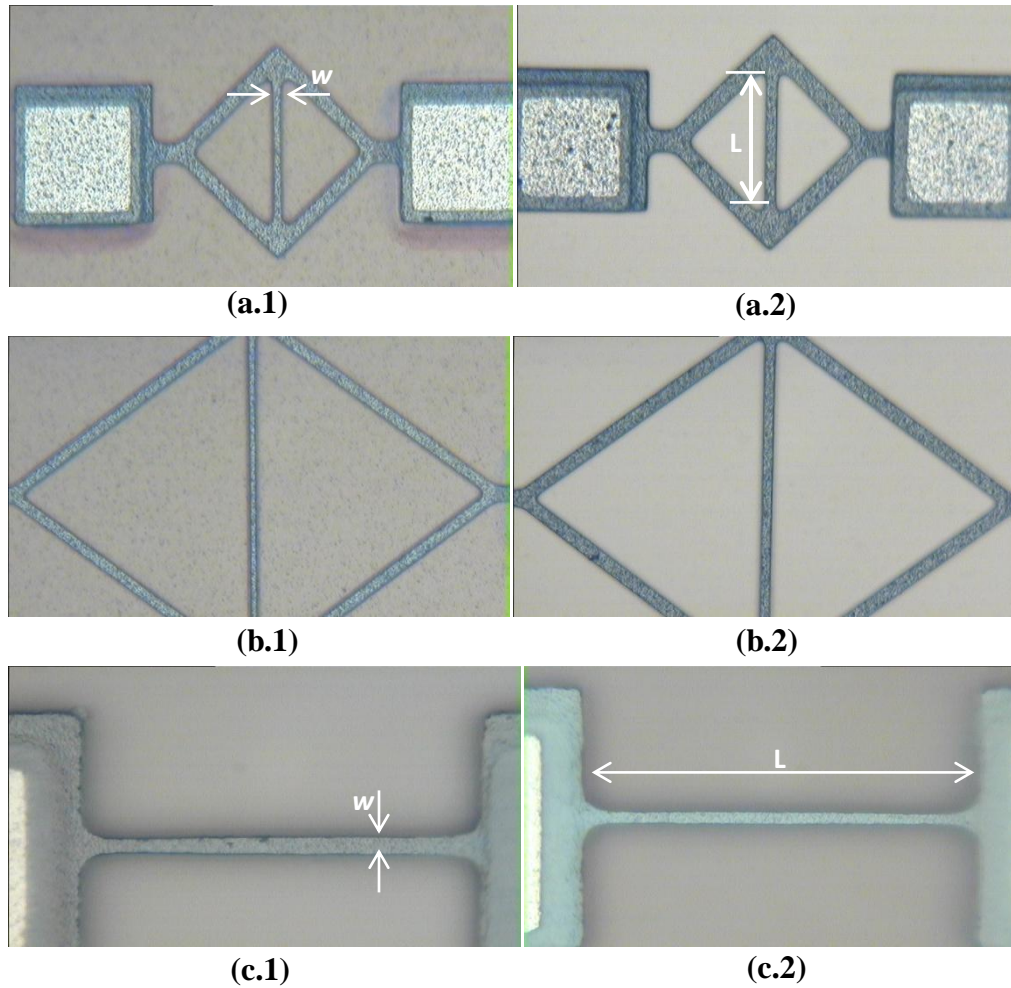
En la siguiente sección se presenta un análisis sobre los esfuerzos mecánicos internos, de compresión, tensión y gradientes; utilizando los monitores tipo puente, trampolín, diamante y de rotación, incluidos en el diseño del chip. Este análisis es obligado ya que el proceso que se reporta en el presente trabajo ha sido modificado en lo que se refiere a ciclos térmicos y a grosores de los materiales.

3.2.1. Esfuerzos de compresión y tensión.

Los esfuerzos de compresión y tensión se miden mediante las microestructuras tipo diamante, puente y de rotación, aspecto analizado en la tesis de [D. Alonso 2008]. La estimación de los esfuerzos mecánicos se describe enseguida. Se toman obleas con microestructuras liberadas y con microestructuras no liberadas. En obleas con microestructuras liberadas, se observa con el microscopio, si existen deformaciones (buckling) en alguna estructura de monitoreo en particular. Inmediatamente, se procede a observar si esta deformación se presenta de manera sistemática tomando aleatoriamente, dados de distintas obleas. Simultáneamente, se toman mediciones de las deformaciones observadas. Estas observaciones deben ser confirmadas con un microscopio SEM.

En la figura 3.12 se presentan unas series de fotografías, tomadas con el microscopio óptico, comparando estructuras no liberadas respecto a liberadas. En las fotografías se muestran monitores tipo diamantes de 100 y 250 μm de longitud por 10 μm de ancho de la barra central; así como también se muestra la fotografía de un estructura tipo puente de 200 μm de largo por 10 μm . De acuerdo a lo reportado por (Alanís Navarro, 2008), la longitud crítica en la que se presenta deformación es 200 μm en los puentes, sin embargo, en las fotografías antes mencionadas claramente se observa que no existen deformaciones evidentes, ni en puentes de 200 μm así como tampoco se observaron deformaciones para puentes mayores a la longitud crítica, lo que se concluye que estas estructuras cuentan con

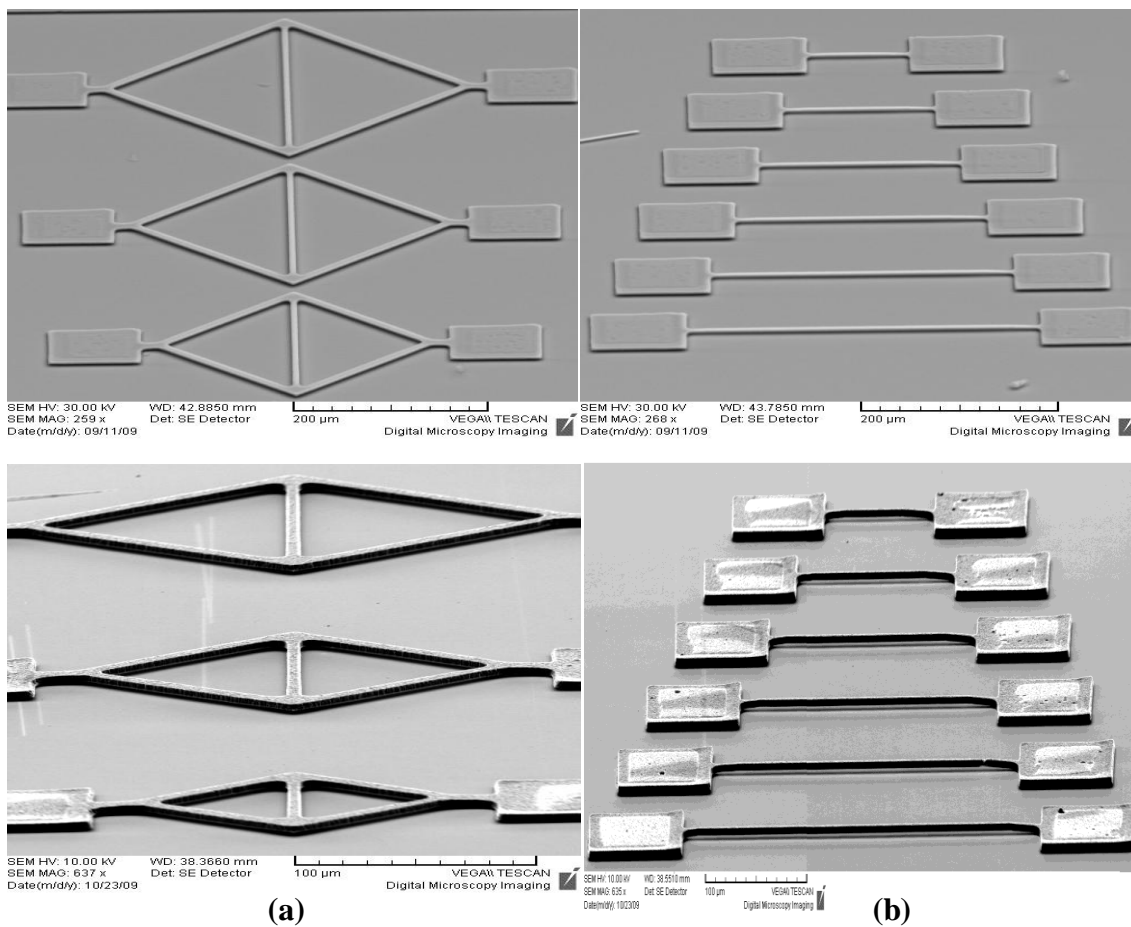
gran estabilidad mecánica. De igual forma, la estabilidad mecánica fue observada en las estructuras tipo diamante.



**Figura 3. 12 Fotografías de monitores de esfuerzos mecánicos,
No es evidente deformación estructural alguna (buckling).
a.1) Diamante sin liberar. a.2) Diamante liberado. $L=100\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}$.
b.1) Diamante sin liberar. b.2) Diamante liberado. $L=250\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}$.
c.1) Puente sin liberar. c.2) Puente liberado. $L=200\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}$.**

La comprobación de estas observaciones se muestra en la Figura 3.12, que presenta una serie de fotografías tomadas con un microscopio SEM, en donde se puede observar un grupo de monitores suspendidos tipo diamante con longitudes de 250, 300 y 350 μm por 10 μm de ancho con respecto a la viga central y estructuras tipo puente con longitudes que van desde 100 μm hasta 350 μm por un ancho de 10 μm . En ambos tipos de estructura se corrobora que no hay deformación alguna.

De lo antes mencionado, se concluye que tanto los ciclos térmicos como las razones geométricas de aspecto para el polisilicio con un espesor de 3 micrómetros (1:1, 1:1.5), contribuyen a un proceso de fabricación de estructuras básicas Joule con gran estabilidad mecánica. De lo anterior, se puede aseverar que el tratamiento térmico post-grabado de polisilicio a 1000°C, reduce los esfuerzos mecánicos internos del polisilicio. De las estructuras de monitoreo se puede concluir que el esfuerzo residual intrínseco del polisilicio es menor que 20 MPa.



(a) **(b)**
Figura 3. 13 Fotografías tomadas con microscopio electrónico SEM.
Se hace evidente que no ocurre deformación alguna (buckling).
a) Estructuras Diamante liberadas. $L=250, 300$ y $350\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}$.
b) Estructuras Puente liberadas. $L=100, 150, 200, 250, 300$ y $350\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}$.

3.2.1 Gradientes.

La medición de los gradientes residuales se realiza con un procedimiento similar al descrito en la sección anterior. Cabe aclarar, que estas mediciones se realizan sobre los monitores tipo trampolín. Las figura 3.14 y 3.15, muestran las fotografías de los trampolines observados en microscopio óptico y SEM; Las imágenes *no hacen evidente deformación alguna* provocada por el gradiente de esfuerzo residual, Por lo que también se deduce que los ciclos térmicos y el incremento del espesor en la película de polisilicio, contribuyeron a obtener microestructuras con gran estabilidad mecánica. Y se puede concluir, de acuerdo con las dimensiones de las estructuras, que el gradiente de esfuerzo residual del polisilicio es menor a $10 \text{ MPa}/\mu\text{m}$.

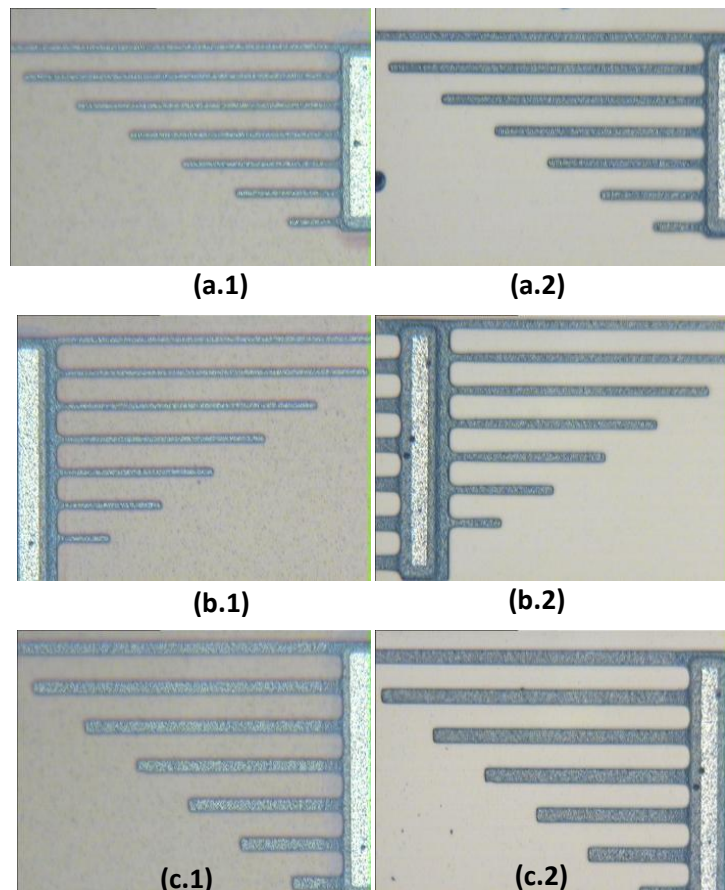


Figura 3. 14 Monitores de gradientes de esfuerzos residuales, no se observa deformación (buckling).
a.1) Trampolines sin liberar. a.2) Trampolines liberados. (Ancho de trampolines $10 \mu\text{m}$.)
b.1) Trampolines sin liberar. b.2) Trampolines liberados. (Ancho de trampolines $12 \mu\text{m}$.)
c.1) Trampolines sin liberar. c.2) Trampolines liberados. (Ancho de trampolines $18 \mu\text{m}$.)

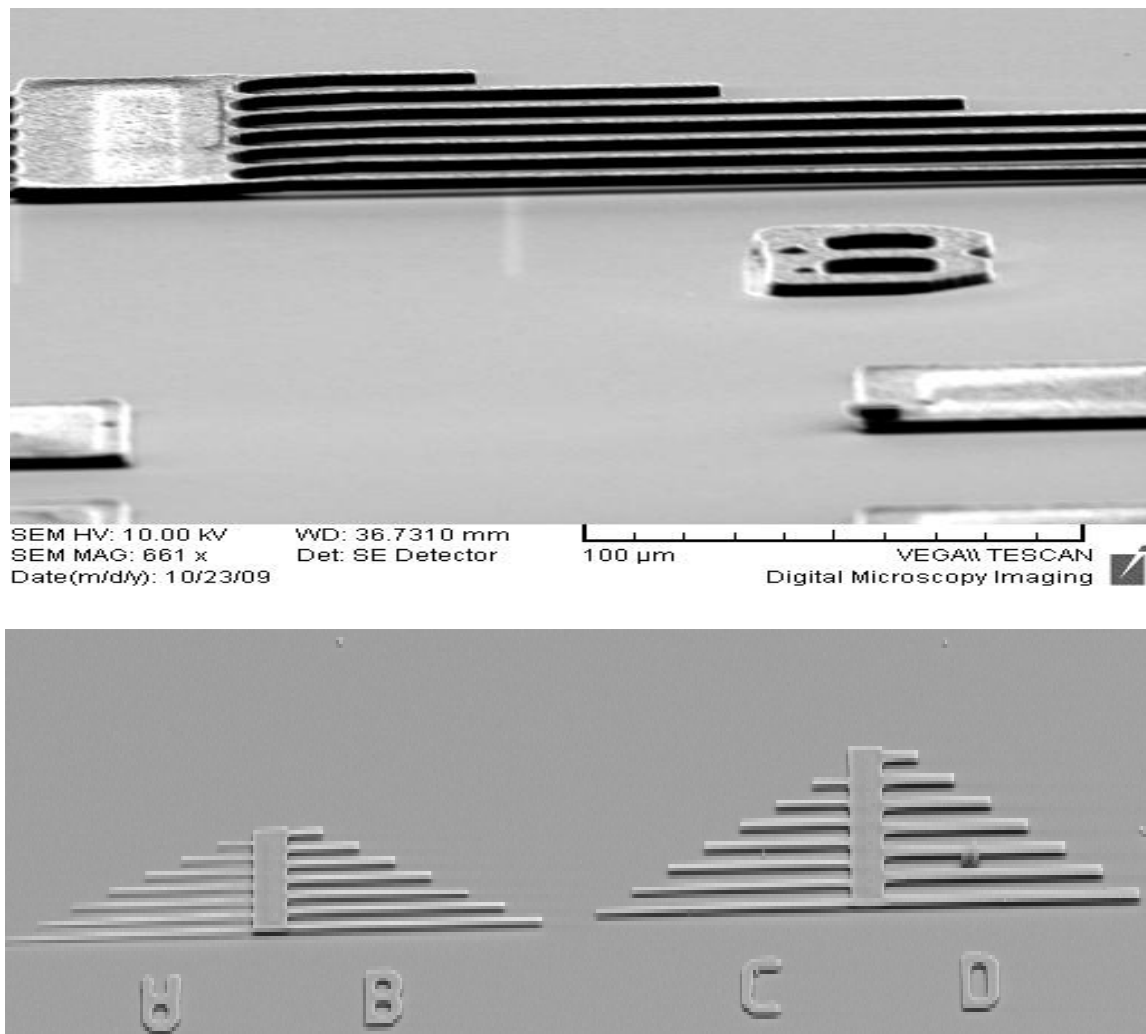


Figura 3. 15 Fotografías SEM de los trampolines. No se observa buckling.
Estructura de monitoreo tipo trampolín con longitudes de 50, 100, 150, 200, 250, 300 y 350 μ m.
El grupo A corresponde a trampolines con un ancho de 5 μ m;
el grupo B son de 10 μ m; el grupo C son de 12 μ m y el grupo D son de 15 μ m.

3.4. Deflexiones mecánicas bajo estimulación eléctrica.

Una tipo de medición que se esperaba realizar durante la caracterización de los microactuadores TBA y TMA, es la obtención de las curvas de desplazamiento contra corriente (u - I). Estas curvas tienen por objetivo el caracterizar de forma clara la cantidad de corriente que es necesario inyectarles a las microestructuras para lograr desplazarlas hasta cierta longitud. Las pruebas se realizan de la siguiente manera: Se hace circular corriente a través de cada microestructura, y se observa la extensión de la desplazamiento mediante un microscopio óptico utilizando el máximo acercamiento disponible. Se parte de una corriente de 10 mA, con incrementos de 10 mA, hasta observar que la microestructura ya no se desplace más.

Actualmente en el laboratorio de microelectrónica del INAOE no se cuenta con el equipo apropiado para realizar dichas pruebas y caracterizar dichas curvas; Sin embargo se intentó una alternativa que consistía en alambrear las muestras mediante un proceso estándar. Este proceso requiere que los pads de las microestructuras sean de tamaño estándar de acuerdo a los lineamientos establecidos en el laboratorio del INAOE, para alambrado, es decir $100 \times 100 \mu\text{m}$ como mínimo. Sin embargo, durante la etapa de diseño no se contempló la etapa del alambrado, por lo que las dimensiones de los pads no fueron diseñados para ser alambrados, esto repercutió en el rendimiento y la calidad del proceso del alambrado.

Además, debido al hecho anterior solo se alambrió una microestructura de cada tipo y en un solo chip. Asimismo, debido a las limitaciones del equipo óptico utilizado las pruebas realizada al chip alambrado no fueron satisfactorias ni concluyentes, por lo que no fue posible obtener las curvas u - I de las microestructuras. Es pertinente mencionar que mediante esta caracterización se obtendrían los cálculos de las fuerzas de propulsión que generan las microestructuras, pero no fue posible calcularlos debido a los inconvenientes antes mencionados. Será necesario realizar las pruebas en algún laboratorio que cuente con el equipo necesario.

En la figura 3.16 se presenta una serie de fotografías en donde se muestra el alambrado de las microestructuras, como se observa no hay un buen rendimiento ni calidad en el alambrado lo que imposibilita una buena caracterización de las curvas u - I . Cabe mencionar que de todas las estructuras alambradas, solo una microestructura resulto intacta y funcional. A esta microestructura se le filmó un video clip, en donde se puede observar el movimiento de desplazamiento, pero no es posible medir el desplazamiento con precisión ya que el acercamiento o zoom óptico del equipo era de apenas 20x.

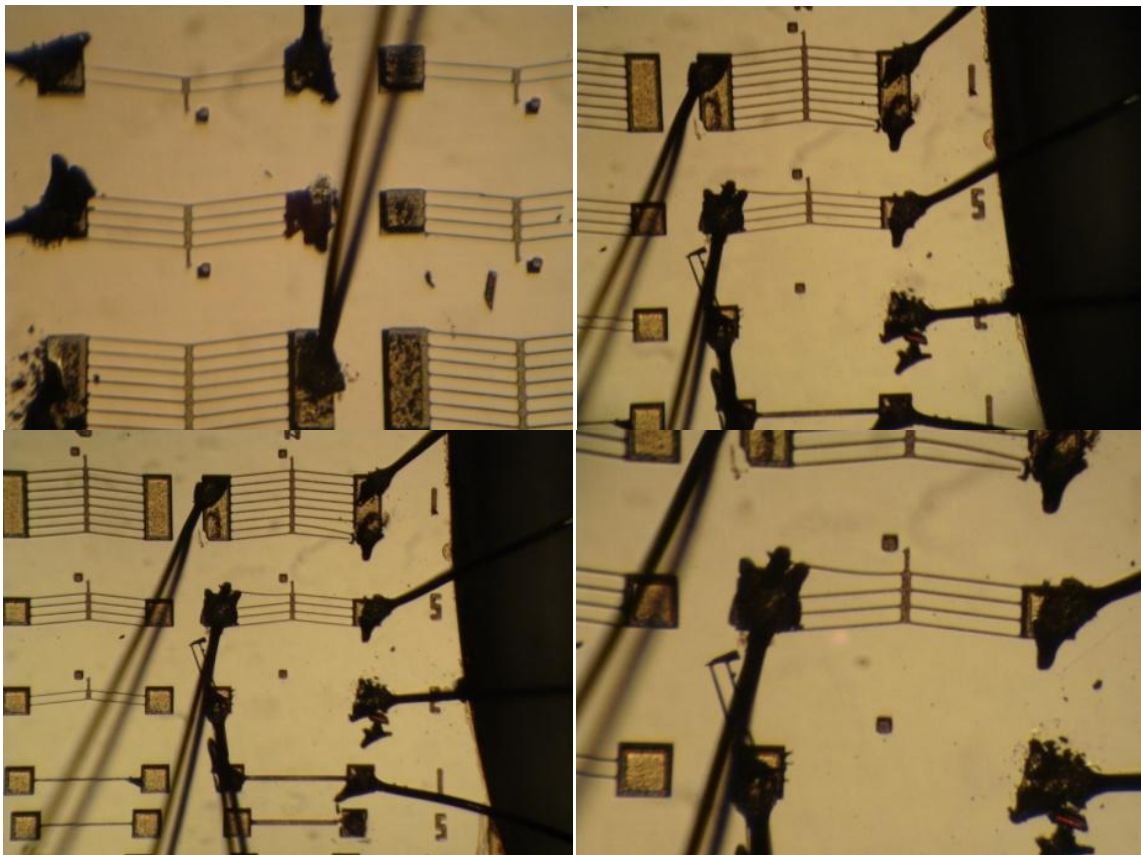


Figura 3. 16 Serie de fotografías que muestran el alambrado de las microestructuras Joule.

3.5 Aplicaciones del efecto Joule.

En esta sección se discuten algunas aplicaciones de las microestructuras Joule presentadas en este trabajo, tomando como referencia un documento publicado por (Girbau, et al., 2000).

3.5.1 Conmutador MEMS de RF basado en el actuador electrotérmico ‘*buckle-beam*’

En esta sección se presenta una aplicación del microactuador TMV, utilizado como un conmutador de RF para comunicaciones propuesto por (Girbau, et al., 2000). El siguiente texto es extraído del artículo original en donde se presenta la aplicación.

“Durante los últimos años, con el progreso de la tecnología MEMS, se han dedicado muchos esfuerzos al desarrollo de dispositivos MEMS para aplicaciones de RF. Una de los conceptos más importantes en aplicaciones RF, son los *conmutadores* de RF. En los conmutadores RF dos factores de mérito importantes son: las pérdidas por inserción en el estado de conducción (ON) y el aislamiento en el estado abierto (OFF). Para minimizar las pérdidas son necesarios contactos metálicos de baja resistividad. Los actuadores electrotérmicos tipo TMV ofrecen desplazamiento lineal y paralelo al sustrato, dos aspectos muy importantes para obtener contactos confiables de baja resistividad. La calidad del contacto depende de la resistencia a la corrosión y dureza del material, así como de la fuerza del contacto. De esta forma, reduciendo las pérdidas en los contactos, el único factor limitante que queda es el sustrato. Se propone el diseño de dos conmutadores MEMS de RF utilizando actuadores del tipo TMV con un proceso estándar de polisilicio. Se han diseñado dos configuraciones de conmutador, paralelo (tipo *DC-contact*) y serie. La figura 3.23 muestra el detalle del conmutador, compuesto por un arreglo de cuatro *TMV*'s para incrementar la fuerza del contacto, y el contacto de un conmutador serie, mientras que la figura 3.24 muestra los esquemas de los conmutadores serie y paralelo, donde se puede apreciar la acción en la actuación de ambos”.

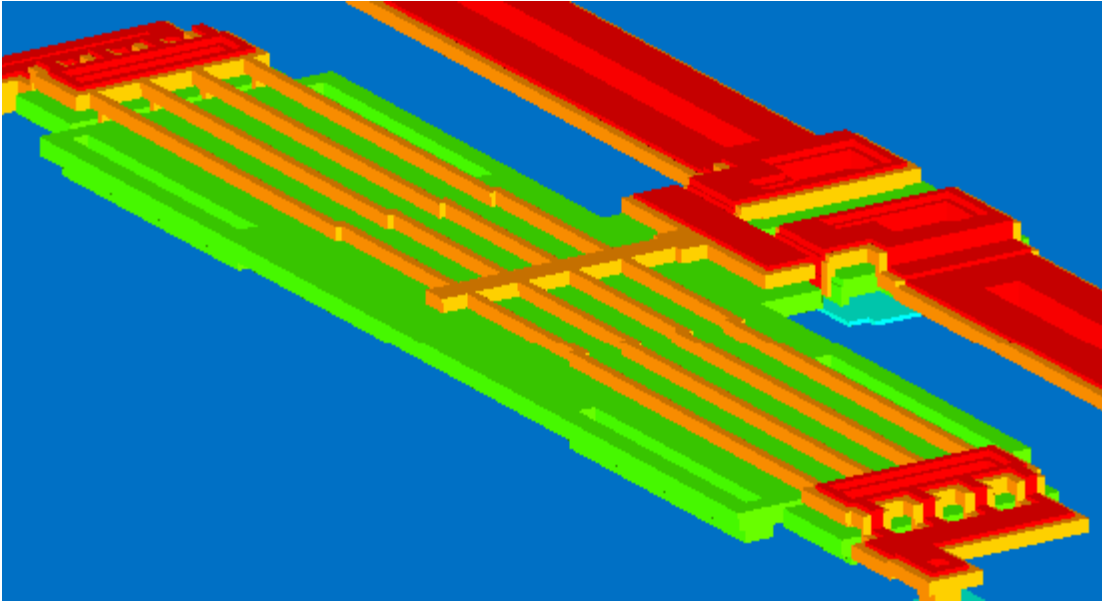
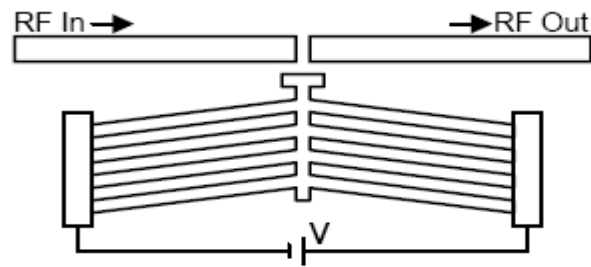
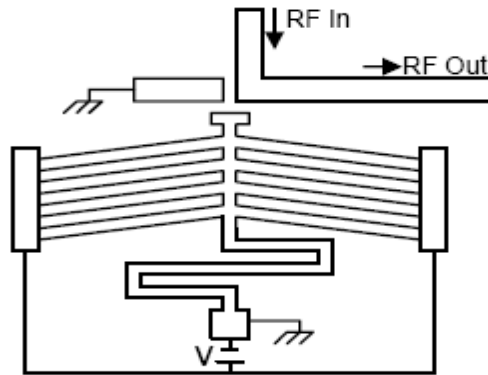


Figura 3. 17 Detalle del actuador y del contacto del conmutador serie (Girbau, et al., 2000).



a. Esquema del conmutador serie.



b. Esquema del conmutador paralelo.

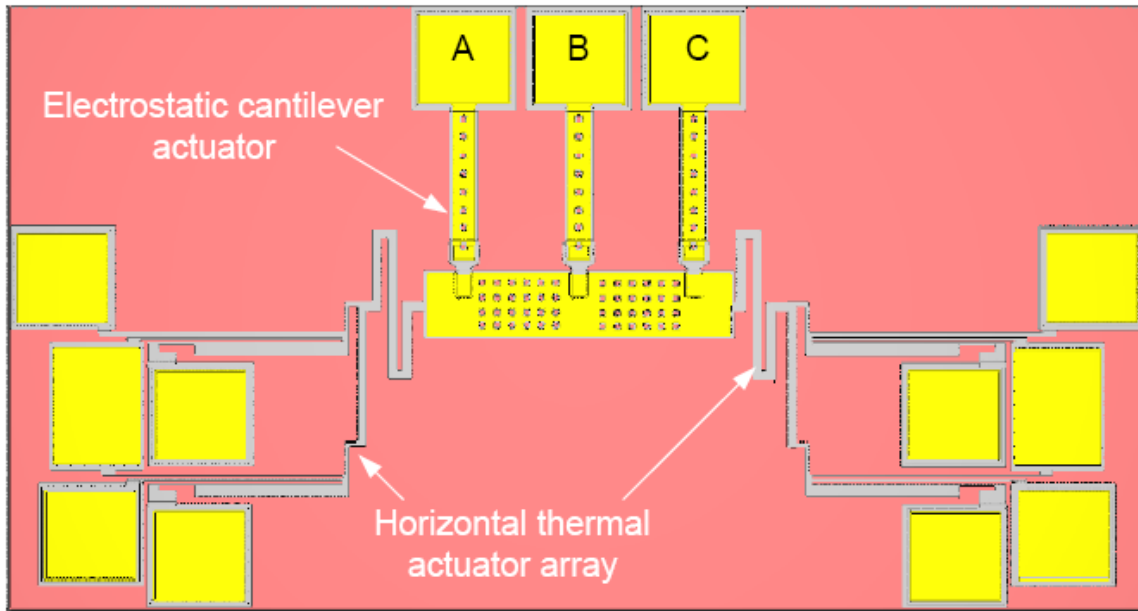
Figura 3. 18 Esquemas de los conmutadores serie y paralelo (Girbau, et al., 2000).

Tal como se puede apreciar, el conmutador paralelo tiene una conexión de polarización diferente al conmutador en serie. Se puede observar que la parte central del conmutador en paralelo está conectada a una masa, y añadiendo una fuerza mecánica, de signo opuesto, que reduce el desplazamiento total. Este conmutador paralelo también permite polarizarse como el serie aislando las masas de RF y DC. La separación entre las líneas de señal y el cabezal de contacto del actuador es de 3 μm con la finalidad de conseguir el contacto con una temperatura máxima local en el actuador relativamente baja.

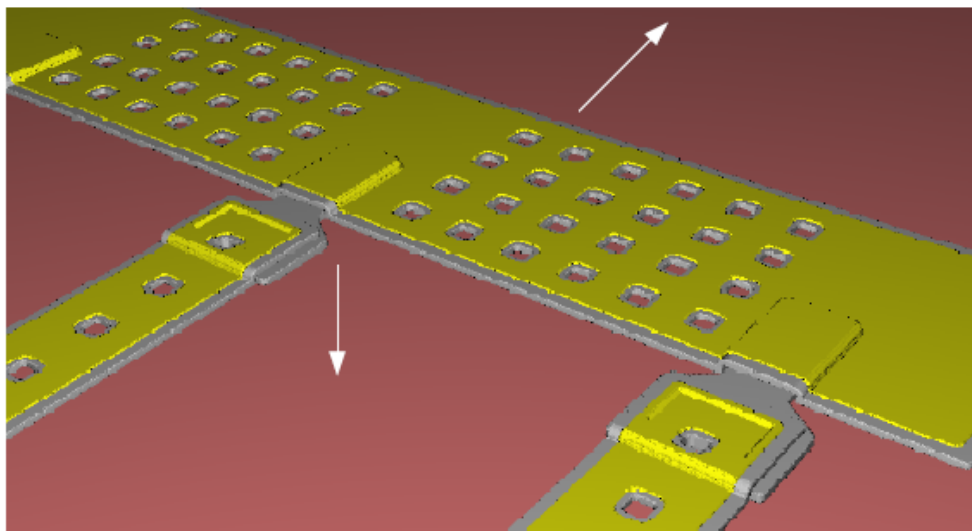
El autor reporta los siguientes resultados: “El conmutador serie presenta unas pérdidas de inserción de 0.38 dB @ 2 GHz, siendo la mayor contribución a estas pérdidas la resistencia de contacto, y un aislamiento de -16 dB @ 2 GHz, limitado por el acoplamiento capacitivo por el sustrato a través de la capa aislante de nitruro de silicio. El conmutador paralelo tiene unas pérdidas de inserción de 0.09 dB @ 2 GHz y un aislamiento de -19 dB @ 2 GHz limitado básicamente por la resistencia de los contactos. El conmutador serie requiere la utilización de un inductor.”

3.5.2 Switch multipuerto para aplicaciones en RF.

Otra aplicación de los termoactuadores es reportada por (Yan, 2002), que tiene una aplicación similar a la mostrada anteriormente, ya que consiste en un switch multipuerto para aplicaciones RF, que puede funcionar como conmutador de señales RF. La figura 3.24 muestra el esquema general del diseño propuesto por (Yan, 2002). En la figura se observa un arreglo de 4 estructuras Joule TBA interconectado a una placa central. Esta placa sirve como switch o conmutador que conecta o desconecta a tres canales de comunicación formados por unos trampolines electrostáticos (señalados en la figura como: A, B y C). Cuando los microactuadores TBA se energizan, desplazan horizontalmente la placa central, de esta manera controlan la conmutación general del switch, logrando conectar o desconectar todos los canales de comunicación (A, B y C) al mismo tiempo. Además, cada trampolín puede conectarse o desconectarse la placa central mediante una acción de deflexión electrostática en dirección vertical. De esta manera se puede controlar el momento en que dos canales o los tres se interconectan entre sí, para establecer la comunicación.



(a)



(b)

Figura 3. 19 a) Vista superior del switch multipuerto.
b) Acercamiento sobre la placa central del multipuerto (Yan, 2002).

El autor de esta aplicación no reporta resultados eléctricos o caracterización alguna del conmutador, ya que al momento de reportar dicha aplicación se encontraba en fase conceptual de diseño.

3.6. Resumen.

En este capítulo se presentaron los resultados de las pruebas eléctricas y mecánicas que se pueden realizar en el laboratorio de microelectrónica del INAOE. Se presentaron gráficas de curvas I-V de los distintos microactuadores, y se pudo comprobar que cuando la dimensión del ancho w de una estructura, se aproxima a la dimensión Δw cualquier variación pequeña en la dimensión w , provocara una variación sustancial en la resistencia eléctrica de la estructura. Así mismo, se presentó evidencia de que las estructuras están suspendidas y poseen gran estabilidad mecánica. Las estructuras utilizadas para monitorear el esfuerzo y gradiente residual intrínseco no presentaron deformación o buckling evidente. De esta manera, se presentan los resultados del esfuerzo mecánico intrínseco y del gradiente de esfuerzo intrínseco, que fueron establecidos en: <20 MPa y <10 MPa/ μm respectivamente. Cabe mencionar que debido a las limitaciones del laboratorio no fue posible realizar una caracterización más completa de las microestructuras. Así mismo, se presentaron aplicaciones de los microactuadores TMV y TBA abordados en este trabajo, como por ejemplo el switch multipuerto reportado por (Yan, 2002), que utiliza un arreglo de microactuadores TBA, para realizar el diseño de un conmutador de comunicaciones que puede interconectar tres canales de RF.

Referencias.

Alanís Navarro, José Andrés. 2008. *Desarrollo del proceso de fabricación PolyMEMS-INAOE.* Puebla, México : s.n., 2008. Tesis.

Cragun, Rebecca and L. Howell, Larry. 1999. *Linear thermomechanical microactuators.* s.l. : ASME, 1999. Vol. 1.

Díaz Alonzo, Daniela. 2008. *Estudio de los mecanismos de colapso en microactuadores y su influencia en microsistemas.* BUAP. Puebla, México : s.n., 2008.

Girbau, David, Lázaro, Antonio and Pradell, Luís. 2000. *Conmutador MEMS de RF basado en el actuador electrotermico buckle-beam.* Cataluña España : s.n., 2000.

Korvink, Jan G. and Paul, Oliver. 2006. *MEMS a practical guide to desing, analysis and applications.* USA : Springer, 2006. p. 752.

Pelesko, John A. and Bernstein, David H. 2003. *Modeling MEMS nad NEMS.* USA : Chapman & Hall/CRC, 2003. Vol. 1.

Quin An, Huang and Neville Ka, Shek Lee. 2000. *A simple approach to characterizing the driving force of polysilicon laterally driven thermal microactuators.* [ed.] Sensors and actuators. 2000. Vol. A.

Yan, Dong. 2002. *Mechanicals desing and modeling of MEMS thermal actuators for RF applications.* University of Waterloo. Waterloo, Ontario : s.n., 2002. Tesis.

Capítulo 4.

Conclusiones y Trabajo Futuro.

4.1 Conclusiones Técnicas.

- Se cumplió con el objetivo de diseñar el chip PolyMEMS V, con micro estructuras móviles que funcionan bajo el efecto Joule.
 - Se obtuvo un procedimiento, basado en plasma RIE de SF₆ aun no optimizado, pero suficiente para grabar películas delgadas de polisilicio con ancho crítico de 5 micrómetros y menores.
 - Con el proceso de grabado seco se obtuvieron perfiles de grabado en el polisilicio con una rampa de 70±3° de inclinación. Lo que permite obtener geometrías más cercanas a las propuestas en el diseño.
 - La técnica de liberación y secado propuesta en este trabajo, mediante el uso de 2-propanol, dio lugar a la obtención de microestructuras suspendidas de manera sistemática.
 - Debido a su característica hidrofóbica, la inclusión de una película de polisilicio no dopado (espesor 0.5µm) como material de soporte, contribuyó en la disminución de las tensiones superficiales provocadas por los líquidos tales; como HF/Agua DI, Acetona, 2-propanol; utilizados durante la liberación y enjuague de las muestras; Lo que contribuyó a disminuir los efectos de colapsos en las microestructuras.
 - En el análisis de los monitores de esfuerzos residuales, no se observaron deformaciones evidentes en el polisilicio estructural. Por lo que se concluye que tanto los ciclos térmicos como las razones geométricas de aspecto para el polisilicio con un espesor de 3 micrómetros (1:1, 1:1.5), contribuyen a un proceso de fabricación de estructuras básicas Joule con gran estabilidad mecánica. Será necesario diseñar rutinas de análisis de estabilidad mecánica funcional a largo plazo.
-
-

- De lo anterior, se puede aseverar que el tratamiento térmico post-grabado de polisilicio a 1000°C, estabiliza los esfuerzos mecánicos internos del polisilicio. De las estructuras de monitoreo se puede concluir que el esfuerzo residual del polisilicio se establece en: esfuerzo residual intrínseco < 20 MPa, y el gradiente de esfuerzo residual < 10 MPa/ μm .

4.2. Conclusiones Generales.

- Los resultados de esta fase experimental, serán utilizados por los grupos de diseño de la red nacional de MEMS y FUMEC.
- Por primera vez se obtienen microestructuras Joule con micromaquinado superficial, bajo un proceso desarrollado íntegramente en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE.
- Esta capacidad de fabricación es la primera y hasta ahora la única en América Latina.
- Este es un proceso aun no optimizado, pero si es suficiente para que los diseñadores de micro mecanismos lo utilicen.

4.3 Trabajo Futuro.

Como trabajo futuro se propone:

- Optimizar el proceso de grabado seco en RIE, para obtener estructuras con paredes verticales, utilizando SF₆ y Cl₂.
- Realizar una caracterización electromecánica más exhaustiva a las microestructuras, para obtener parámetros más exactos como, fuerza de propulsión, rigidez, elasticidad, fatiga, etc.
- Del punto anterior, se hace más evidente la necesidad de contar con un laboratorio en el INAOE, para la caracterización electromecánica de microestructuras.
- Caracterización electromecánica, dentro y fuera del INAOE.
- Caracterización de confiabilidad a largo plazo de las microestructuras, diseñando e implementando: Pruebas de aceleramiento, Análisis estructural.
- Diseño y fabricación de micro mecanismos de propósito específico.
- Diseño de mecanismos inteligentes.

Apéndice A.

Cálculo de la fuerza propulsora para un termo micro actuador bimorfo.

El siguiente apartado, muestra el método y las ecuaciones necesarias para calcular la fuerza de propulsión de un termo micro actuador bimorfo, a partir de su deflexión. Dicho método se basa en el análisis de estructuras elásticas, y es tomada del artículo (Qing-An, et al., 2000).

La aproximación que utiliza la ecuación es la siguiente: Cuando no hay corriente, el actuador se mantiene en estado estático. Si una fuerza externa, F , es aplicada al final del actuador esta producirá una deflexión. Se considera que la deflexión producida por la fuerza externa, es la misma que generaría una corriente aplicada en el actuador. De esta manera, F pretende ser la misma fuerza impulsora que ejerce el actuador. La diferencia es que la fuerza impulsora ejercida por el actuador es en dirección opuesta a la fuerza externa. Por lo tanto, si se conoce la deflexión del actuador, se puede calcular la fuerza que ejerce para flexionarse.

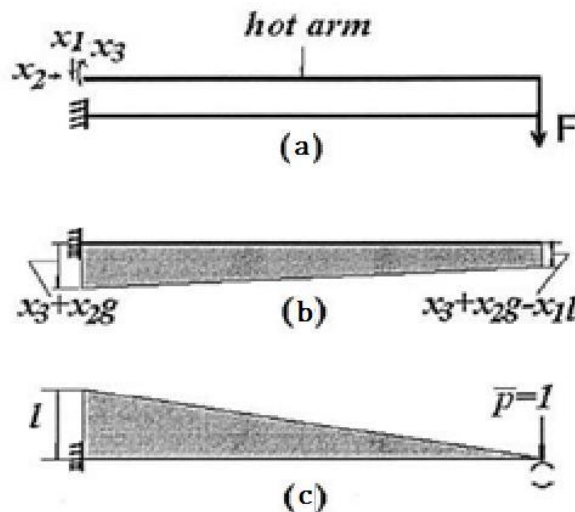


Figura A. 1 Diagrama esquemático estructural de un termo actuador bimorfo.

La deflexión del actuador debido a una fuerza puede estimarse de la siguiente manera. La estructura del termo actuador como se muestra en la figura A.1(a) es similar a un plano estructural rígido con dos bases fijadas por ingeniería estructural. El momento de doblamiento de la estructura se analiza a partir de 3 fuerzas redundantes X_1 , X_2 y X_3 como se muestra en la Fig. A.1(b). Donde X_1 permanece en el plano horizontal, X_2 es una fuerza vertical y X_3 es una fuerza de acoplamiento. El método de trabajo-virtual para ingeniería estructural, es entonces utilizado, para estimar la deflexión del actuador.

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta_{1p} \\ -\Delta_{2p} \\ -\Delta_{3p} \end{bmatrix}$$

Donde los términos f_{ij} representan los coeficientes de flexibilidad, X_i representan los momentos; y los términos $-\Delta_{ip}$ representan cualquiera de los desplazamientos o rotaciones debidas a las fuerzas redundantes X_1 , X_2 , X_3 y F . Estas son obtenidas de las siguiente manera:

$$f_{11} = \frac{1}{3EI_h}(L^3 + L_f^3) + \frac{1}{3EI_c}(3L^2g + L^3 - L_f^3) \quad (\text{A.1})$$

$$f_{12} = f_{21} = -\frac{1}{2EI_h}(L_f^2g) - \frac{1}{2EI_c}(g^2L + L^2g - L_f^2g) \quad (\text{A.2})$$

$$f_{13} = f_{31} = \frac{1}{2EI_h}(L^2 + L_f^2) - \frac{1}{2EI_c}(L^2 + 2Lg - L_f^2) \quad (\text{A.3})$$

$$f_{22} = \frac{1}{3EI_c}(g^3 + 3L_c g^2) + \frac{1}{EI_h}(L_f g^2) \quad (\text{A.4})$$

$$f_{23} = f_{32} = \frac{1}{2EI_c}(g^2 + 2gL_c) + \frac{1}{EI_h}(gL_f) \quad (\text{A.5})$$

$$f_{33} = \frac{1}{EI_h}(L + L_f) + \frac{1}{EI_c}(L_c + g) \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta_{1F} = -\frac{1}{6E} \left[\frac{L_c^2}{I_c}(2L_f + L) + \frac{L_f^2}{I_f}(2L_c + L) \right] \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta_{2F} = \frac{g}{2E} \left[\frac{L_c^2}{I_c} + \frac{L_f}{I_f}(L_c + L) \right] \quad (\text{A.8})$$

$$\Delta_{3F} = \frac{1}{2E} \left[\frac{L_c^2}{I_c} + \frac{L_f}{I_f}(L_c + L) \right] \quad (\text{A.9})$$

Donde E es el modulo de Young , L , L_c y L_f son la longitud del brazo caliente, brazo frío y del brazo flexor, respectivamente, g es la separación entre los brazos caliente y frío, $I_h = I_f = \frac{hw_h^3}{12}$ son el momento de inercia del brazo caliente y el flexor, $I_c = \frac{hw_c^3}{12}$ es el momento de inercia del brazo frío.

$$X_1 = F \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (\text{A.10})$$

$$X_2 = F \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (\text{A.11})$$

$$X_3 = F \frac{\Delta_3}{\Delta} \quad (\text{A.12})$$

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} -\Delta_{1F} & f_{12} & f_{13} \\ -\Delta_{2F} & f_{22} & f_{23} \\ -\Delta_{3F} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} f_{11} & -\Delta_{1F} & f_{13} \\ f_{21} & -\Delta_{2F} & f_{23} \\ f_{31} & -\Delta_{3F} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & -\Delta_{1F} \\ f_{21} & f_{22} & -\Delta_{2F} \\ f_{31} & f_{32} & -\Delta_{3F} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

De acuerdo con el método de trabajo-virtual, la deflexión al final del actuador puede ser escrita de la siguiente manera:

$$u = \int \frac{\overline{MM}}{EI_c} ds = \frac{L_f}{6EI_f} \{(2L_c + L)[X_3 + X_2g - X_1(L - L_c)] + (2L + L_c)(X_3 + X_2g)\} \\ + \frac{L_c^2}{6EI_c} [3(X_3 + X_2g - X_1L) + 2X_1L_c]$$

De las ecuaciones (A.10) – (A.20), se resuelven para obtener:

$$F = \frac{6Eu\Delta}{\frac{L_f}{I_f} \{(2l_c + l)[\Delta_3 + \Delta_2 - \Delta_1(l - l_c)] + (2l + l_c)(\Delta_3 + \Delta_2g)\} + \frac{l_c^2}{I_c} [3(\Delta_3 + \Delta_2g - \Delta_1L) + 2\Delta_1l_c]}$$

Donde la fuerza de propulsión del actuador puede ser calculado a partir de la deflexión (u) conocida.

Apéndice B.

Proceso de Fabricación del Chip PolyMEMS V.

A continuación se presenta el proceso de fabricación del chip polyMEMS V, mediante micro maquinado superficial. Cabe mencionar que dicho proceso parte de las bases sentadas en la tesis de (Alanís Navarro, 2008). En dicho trabajo se desarrollo el proceso PolyMEMS del INAOE, del cual, se hicieron modificaciones para asegurar el éxito en el proceso de fabricación del chip PolyMEMS V. Las consideraciones para la fabricación son las siguientes:

Se utilizan cinco materiales: dos niveles de materiales estructurales de poly-Si, uno fijo al sustrato utilizado como electrodo, y un nivel suspendido para la fabricación de monitores mecánicos, sensores y actuadores principalmente; vidrio de fosfosilicato (PSG) como material de sacrificio (o soporte mecánico temporal), aluminio (Al) como material de interconexión eléctrica, y dióxido (SiO₂). Además se utiliza poly-silicio sin dopar como material aislante eléctrico. Y como soporte mecánico se utilizan obleas de silicio cristalino con orientación (100) de 2" de diámetro.

Solo se utilizaron 2 niveles de mascarillas: el primer nivel se utiliza para definir las bases de fijación al sustrato, además, se utiliza para definir los contactos eléctricos de cada estructura; El segundo nivel se utiliza para definir la litografía de las estructuras Joule, y monitores mecánicos.

Además se plantea un proceso de liberación totalmente húmedo, considerando las capacidades técnicas y de infraestructura del laboratorio de microelectrónica del INAOE. El proceso de fabricación es el siguiente:

- 1. Desengrasado estándar.**

Desengrasado con TCH, Acetona y limpiezas RCA's.

2. **Crecimiento de óxido de campo (Horno de oxidación inicial).**

Condiciones: Espesor = 2000 Å. Temperatura = 1000°C, Tiempo = 30min, Flujo: H₂O en vapor.

3. **Deposito de película de *poly-silicio sin dopar* (horno LPCVD).**

Condiciones:

Espesor = 0.5 µm; Temperatura = 650°C; Tiempo = 30 min.

Flujo y presión SiH₄(5% en N₂) = 130ss, 1.565 Torr.

Nota: Es importante asegurar la precisión y la estabilidad, de la temperatura y presión especificadas para cada sistema (LPCVD, APCVD). Se recomienda realizar un depósito de prueba.

4. **Deposito de película PSG (horno APCVD).**

Condiciones:

Temperatura = 450°C.

Primero se deposita una película delgada de SiO₂:

Espesor = 2000 Å; Tiempo = 4 min, Flujos: N₂(2) = 80ss; O₂ = 8ss; SiH₄ = 125ss.

Seguidamente se deposita la película de PSG:

Espesor = 2.5 µm; Tiempo = 58 min, con los mismos flujos anteriormente citados, más el flujo de PH₃= 13ss.

5. **Reflujo de PSG (horno de oxidación inicial).**

Condiciones:

Temperatura = 1000°C; Tiempo = 30 min en ambiente de H₂O en vapor; Y

Tiempo = 20 min en flujo de N₂ = 40ss.

Concluido el reflujo, se realiza un decapado de PSG en solución HF 7:1, por un tiempo = 10 seg.

Nota: El depósito de la película de PSG y el reflujo de PSG deberá realizarse de manera inmediata; Para evitar que el PSG absorba la humedad del ambiente.

6. Litografía de ventanas. (Mascarilla 1 del chip PolyMEMS V).

Condiciones de litografía:

Pre calentamiento de obleas por 30 min @ 110 °C.

Aplicación de resina (-) MA-1420 @ 5000 rpm por 30seg.

Pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C.

Tiempo de exposición = 10 seg. Revelado = 35 seg.

Recocido de resina por 15 min @ 110 °C.

7. Grabado humedo de PSG.

Condiciones:

Solución 7:1 @ 32 °C.

Se realiza por etapas, de grabado y pos-recocido de la resina, según el estándar implementado en el laboratorio de micro electrónica del INAOE.

Se retira la resina con acetona por 10 min.

Y se realizan limpiezas RCA's para el siguiente procedimiento.

8. Deposito de Poly-Silicio estructural, dopado n+ (Horno LPCVD).

Condiciones de depósito:

Espesor: 3 μm ; Mismas condiciones del paso 3; Tiempo = 3 hrs;

Condiciones de dopado n⁺:

Temperatura = 1000°C; Tiempo = 105 min; Flujos: N₂ = 25ss; O₂=10ss; PH₃=80ss.

Nota: El depósito y dopado de la película de Poly-Si estructural debe realizarse en secuencia inmediata. Inmediatamente, se realiza un decapado con solución HF 7:1, para eliminar el vidrio de fosforo que se forma durante el dopado. Es conveniente realizar mediciones de la resistencia de lámina R_s del poly-silicio para asegurar un buen dopado. Resistencia de lámina esperada $R_s = 4$ a $14 \Omega\text{-}\square$.

9. Litografía de Poly-Silicio estructural (Mascarilla 2 del chip PolyMEMS).

Limpiezas RCA's estándar.

Condiciones:

Pre calentamiento de obleas por 15 min @ 110 °C;

Aplicación de resina (+) MA-1225 @ 3000 rpm por 30seg;

Pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C.

Tiempo de exposición = 10 seg; Revelado = 5 seg.

Recocido de resina = 25 min @ 135 °C.

10. Grabado seco en RIE del Poly-Silicio estructural (Micro-RIE 800).

Condiciones:

Potencia = 150 W; Presión base SF₆= 150 mTorr; Tiempo = 15 min.

Gas = SF₆; La razón de grabado = 2300 Å/min.

Nota: El tiempo de grabado puede variar (hasta por 60 min), según la uniformidad de la película de poly-silicio.

11. Tratamiento Térmico del Poly-Silicio (Horno de oxidación inicial).

Limpiezas RCA's estándar.

Condiciones:

Temperatura=1000 C°.

Flujo de Gas N₂ = 45 ss.

Tiempo = 30 min.

12. Deposito de Aluminio. (Evaporadora de Aluminio).

Limpiezas RCA's estándar.

Depositar Aluminio; Espesor = 1 µm, mediante el proceso de PVD.

13. Litografía de Contactos Eléctricos (Mascarilla 1 del chip PolyMEMS V).

Condiciones:

Pre calentamiento de obleas por 15 min @ 110 °C.

Se aplica resina (+) MA-1225 @ 5000 rpm por 30seg.

Pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C.

Tiempo de exposición = 10 seg. Revelado = 5 seg.

Recocido de resina por 20 min @ 110 °C.

14. Grabado del Aluminio.

Condiciones:

Solución Al-Etch; Tiempo inicial = 4 min @ 40°C;

Se realiza un pos-recocido de la resina = 10 min @ 110 °C.

Tiempo de grabado restante = 5 min @ 40 °C.

Posteriormente, se retira la resina por 10 min en acetona.

15. Aleación del aluminio.

Condiciones:

Limpieza en nítrico fumante por 10 min.

Aleación por 30 min @ 450 °C; Flujos: N₂ = 60ss; H₂ = 40 ss.

16. Litografía de pasivación de contactos (liberación, Mascarilla 1 del chip PolyMEMS V).

Condiciones:

Pre calentamiento de obleas por 15 min @ 110 °C.

Aplicación de resina (+) MA-1225 @ 5000 rpm por 30seg.

Pre-cocido de resina = 15 min @ 83 °C.

Tiempo de exposición = 10 seg. Revelado = 5 seg.

Recocido de resina por 15 min @ 110 °C.

17. Liberación de estructuras suspendidas.

1. La oblea fue cortada en 4 partes iguales, seguidamente, se coloca una de ellas, en posición vertical dentro de un embudo de separación, resistente al HF.
2. Se vierte ácido fluorhídrico (HF al 49% a temperatura ambiente), dentro del embudo hasta que se remoje totalmente la muestra, por 4 min.
3. Transcurrido el tiempo, agregar 2 propanol @ 62°C; y eliminar con ayuda del embudo de separación el HF, sin que la muestra deje de estar remojada dentro de líquido.
4. Agregar Agua DI @ 62 °C; y eliminar el 2 propanol, sin que la muestra deje de estar remojada dentro de líquido.
5. Agregar Acetona @ 62 °C; y eliminar el Agua DI, sin que la muestra deje de estar remojada dentro de líquido.
6. Agregar Agua DI @ 62 °C; y eliminar el Acetona, sin que la muestra deje de estar remojada dentro de líquido.
7. Agregar 2 propanol @ 62 °C; y eliminar el Agua DI, sin que la muestra deje de estar remojada dentro de líquido.
8. Sin retirar la muestra del 2 propanol, meterla en un horno @ 120 °C hasta evaporar todo el solvente. Una vez evaporado el solvente, las muestras han quedado liberadas.

Verificar las muestras bajo el microscopio para asegurarse de que las estructuras fueron liberadas satisfactoriamente.

Índice de Figuras.

Capítulo 1.

Figura 1. 1 Ilustración del efecto Joule.....	8
Figura 1. 2 Micro actuador térmico bimorfo (TBA).	10
Figura 1. 3 Micro actuador de viga en V termo elástico (TMV).....	10
Figura 1. 4 Micro actuador térmico bimorfo de doble brazo caliente.	13
Figura 1. 5 Trampolín de prueba acoplado al shuttle del microactuador.	15

Capítulo 2.

Figura 2. 1 Patrón geométrico del chip PolyMEMS V.	19
Figura 2. 2 Mascarillas para la fabricación del PolyMEMS V.	19
Figura 2. 3 Estructura monitora tipo puente.	22
Figura 2. 4 Estructura monitora tipo diamante.	23
Figura 2. 5 Estructura monitora tipo trampolín.	24
Figura 2. 6 Estructura de análisis de esfuerzos tipo rotación.	26
Figura 2. 7 Estructura de un Micro Actuador Térmico Bimorfo (TBA).	27
Figura 2. 8 a) Micro Actuador Térmico Bimorfo de brazo caliente Corto (TBA-HS). b) Micro Actuador Térmico Bimorfo de brazo Caliente Largo (TBA-HL).	28
Figura 2. 9 Micro actuador Térmico Bimorfo de Doble Brazo Caliente TBA-DH.....	29
Figura 2. 10 Micro Actuador Térmico Chevron (TMV).	30
Figura 2. 11 Esquema en 3D del proceso de fabricación de las microestructuras.	34
Figura 2. 12 Continuación del proceso de fabricación.....	35
Figura 2. 13 Gráficas obtenidas de la primera prueba de grabado seco en el polisilicio.	39
Figura 2. 14 Gráficas de grabado seco obtenidas en la segunda etapa de prueba.....	39
Figura 2. 15 Fotografías ilustrando el perfil de las pistas de polisilicio, utilizando el RIE con plasma de SF ₆	40
Figura 2. 16 Fotografías que ilustran la prueba de liberación, en donde se utilizó resina como soporte temporal y plasma RIE de O ₂ como grabante de la resina.....	41
Figura 2. 17 Fotografías que ilustran la 2da prueba de liberación.	43
Figura 2. 18 Fotografías correspondientes a microestructuras TBA y TMV suspendidas.	45

Capítulo 3.

Figura 3. 1 Estructuras elegidas para mediciones eléctricas.	48
Figura 3. 2 Fotografía tomada con microscopio SEM del Chip PolyMEMS V.	49
Figura 3. 3 Gráficas de I-V de las estructuras tipo puente con una longitud 200 m.	50
Figura 3. 4 Representación grafica de la disminución de volumen en una estructura	51
Figura 3. 5 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A1.	54
Figura 3. 6 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A2.	54
Figura 3. 7 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A3..	55
Figura 3. 8 a) Gráfica de la curva I-V del TBA-A4.	55
Figura 3. 9 a) Gráfica de la curva I-V del TMV-A1.....	58
Figura 3. 10 a) Gráfica de la curva I-V del TMV-A2.....	58
Figura 3. 11 a) Gráfica de la curva I-V del TMV-A3.....	58
Figura 3. 12 Fotografías de monitores de esfuerzos mecánicos	60
Figura 3. 13 Fotografías tomadas con microscopio electrónico SEM.....	61
Figura 3. 14 Monitores de gradientes de esfuerzos residuales, no se observa deformación (buckling).....	62
Figura 3. 15 Fotografías SEM de los trampolines.....	63
Figura 3. 16 Serie de fotografías que muestran el alambrado de las microestructuras Joule.	65
Figura 3. 17 Detalle del actuador y del contacto del conmutador serie.....	67
Figura 3. 18 Esquemas de los conmutadores serie y paralelo	67
Figura 3. 19 a) Vista superior del switch multipuerto. b) Acercamiento sobre la placa central delmultipuerto.....	69

Apéndice A.

Figura A. 1 Diagrama esquemático estructural de un termo actuador bimorfo.	75
---	----

Índice de Tablas.

Capítulo 1.

Tabla 1.1 Mecanismos comunes de micro actuadores.....	9
---	---

Capítulo 2.

Tabla 2. 1 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo puente.	22
Tabla 2. 2 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo diamante.	23
Tabla 2. 3 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo trampolín.	25
Tabla 2. 4 Dimensiones para el arreglo de monitores tipo rotación.....	26
Tabla 2. 5 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA-HS.....	28
Tabla 2. 6 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA convencionales.	28
Tabla 2. 7 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA-HL.....	29
Tabla 2. 8 Dimensiones para el arreglo de estructuras TBA-DH.	30
Tabla 2. 9 Dimensiones para el arreglo de la fila 1 de TMVs.	31
Tabla 2. 10 Dimensiones para el arreglo de la fila 2 de TMVs.	31
Tabla 2. 11 Dimensiones para el arreglo de la fila 3 de TMVs.	31

Capítulo 3.

Tabla 3. 1 Valores de las resistencias, para las microestructuras tipo puente.	52
Tabla 3. 2 Dimensiones medidas en microscopio (mag 100X) de las estructuras TBA..	53
Tabla 3. 3 Valores de las resistencias para las microestructuras TBA.	54
Tabla 3. 4 Dimensiones medidas en microscopio (mag 100X) de las estructuras TMV.....	57
Tabla 3. 5 Magnitudes de las resistencias para las microestructuras TMV.....	57