

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
(UAEM)**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
(CIICAP)**

“DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZAS”

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS CON OPCIÓN
TERMINAL EN TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA:

MICA. PEDRO VARGAS CHABLÉ

ASESOR: DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

SINODALES:

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE

DRA. SVITLANA KOSHOVA

DR. VOLODYMYR GRIMALSKY

DR. RAMÓN CABELLO RUÍZ

DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ

DR. OUTMANE OUBRAM

CUERNAVACA, MORELOS.

2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



"2019, a 100 años del asesinato del General Emiliano Zapata Salazar"

Cuernavaca, Morelos, a 07 de febrero de 2019.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS "DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZAS" que presenta el alumno **PEDRO VARGAS CHABLÉ**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS** con opción terminal en **TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

| NOMBRE | DICTAMEN | FIRMA |
|------------------------------------|----------|-------|
| DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE | Aprobado | |
| DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ | Aprobado | |
| DRA. SVITLANA KOSHOVA | Aprobado | |
| DR. VOLODYMYR GRIMALSKY | Aprobado | |
| DR. RAMÓN CABELLO RUÍZ | Aprobado | |
| DR. OUTMANE OUBRAM | Aprobado | |
| DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Aprobado | |

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

Resumen

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS), son sistemas en la escala de los micrómetros que pueden integrar complejos elementos mecánicos, eléctricos, ópticos, electrónicos y otros más de manera monolítica en un solo sustrato o “microchip”. Así, cada micromáquina puede contener sensores, actuadores, circuitos de cómputo y procesamiento.

Nacidos de la industria de los circuitos integrados, los MEMS hallan aplicaciones que van desde la instrumentación militar hasta la comercial, constituyendo una industria de alto impacto económico, fortaleciendo ampliamente a las economías de los países líderes en estas tecnologías.

Entre la variedad de actuadores MEM, se encuentran las micropinzas, las cuales se utilizan en diversos campos, entre los que destaca: la manipulación de partículas en la industria mecatrónica. Para llevar a cabo tales aplicaciones, es necesario que satisfagan los requerimientos de funcionamiento de cada caso, siendo particularmente importantes: su apertura, fuerza, frecuencia y la temperatura de operación.

De acuerdo a los elementos que les dan origen, algunas micropinzas se basan en actuadores chevrón, otras utilizan U-beams, capacitores de diferentes tipos, o solamente arreglos de cantiléver. Cabe señalar que, las diversas aproximaciones que se realizan, tienen la finalidad de mejorar los parámetros de desempeño.

En este trabajo, proponemos un nuevo diseño de micropinza, la cual tiene como elemento de diseño básico un actador chevrón, el cual a su vez se forma de un arreglo de cantiléver. Para analizar el funcionamiento de los elementos básicos, se hace uso del modelado teórico, así como de la simulación mediante Ansys, logrando que el error entre los resultados obtenidos sea muy reducido, en todos los casos, menor al 1%. Para el caso de sistemas complejos, de acuerdo con la literatura especializada consultada, el análisis se realizará mediante simulación.

Además de considerar al Silicio como material estructural, se realizan simulaciones considerando la implementación de la pinza con Polisilicio y Nitruro de Silicio, con la finalidad de analizar la factibilidad de su uso, con base en el comportamiento de los parámetros de desempeño de las micropinzas implementadas.

Cabe señalar que, de un trabajo posterior, sobre la generalización de una de las micropinzas consideradas, se realizó una solicitud de patente, la cual se basa un el pandeo de los elementos cantiléver que, funcionan como base de los brazos de apertura de la nueva micropinza.

Abstract

Microelectromechanical systems (MEMS) are systems in the scale of micrometers that can integrate complex mechanical, electrical, optical, electronic and other elements in a single substrate. Thus, each micromachine can contain sensors, actuators, computation and processing circuits.

MEMS were born from the integrated circuits industry, they find applications ranging from military to commercial instrumentation, constituting an industry with a high economic impact, greatly strengthening the economies of the leading countries in these technologies.

Among the variety of actuators MEMS, we can find the microgrippers, which are used in various fields, among them highlights: the handling of particles in the mechatronic industry. To carry out such applications, it is necessary that they satisfy the operating requirements of each case, being particularly important: their opening, strength, frequency and the operating temperature.

According to the elements that give them origin, some micropinzas are based on chevron actuators, others use U-beams, capacitors of different types, or only cantilever arrangements. It should be noted that the design approaches are made with the purpose of improving the microgrippers' performance parameters.

In this work, a new microgripper design is proposed, which has as basic element to a chevron actuator, which is formed by an arrangement of cantilever. To analyze the performance of the basic elements of the microgripper, theoretical modeling is used, as well as the simulation, by Ansys. The error between theoretical results and simulation is very low, in all cases, less than 1%. Due to the complexity of the systems, microgripper analysis is made with simulation, as other cases found in the specialized literature.

In addition to Silicon, simulations are carried out considering the implementation of the microgripper with Polysilicon and Silicon Nitride, in order to analyze the feasibility of their use as structural materials, based on the behavior of the microgripper's performance parameters.

It should be noted that, after finishing this work, based on the generalization of one of the micropinzas considered, a patent application was made, which is based on the buckling of the cantilever elements that work as a base for the opening arms of the new microgripper.

Agradecimientos

Agradecimiento en primera parte al todo poderoso, ese ser de luz o de oscuridad que nos permite discernir entre el bien y el mal, a disfrutar cada instante de nuestras vidas, a entender el propósito de estar en cada lugar que caminamos para encontrar la felicidad o ser feliz. Por el espectáculo de incandescencia encendida que ebulle en el alma y se transforma en humanidad.

Un agradecimiento enorme e importante en esta travesía del conocimiento es para mi asesora la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres, por permitirme ser parte de su grupo de trabajo, por los consejos académicos, profesionales y de comportamiento social. Más importante aún, por todas aquellas correcciones realizadas en el transcurso de este trabajo de tesis, infinitamente agradecido!

Agradezco también al resto de mis profesores miembros del comité tutorial, en particular a la Dra. Svitslana Kosheva, al Dr. J. Jesús Escobedo, al Dr. Volodymyr Grimalsky y Dr. J. Alfredo Rodríguez por sus invaluable observaciones, correcciones, consejos y transmisión del conocimiento.

Sin la ayuda de la beca de posgrado del PNPQ no habría sido posible salir de mi comunidad "Sancarleña" del municipio de Macuspana, Tabasco, México, hablantes del Yekot'an, ¡que amo mucho! pero que sin la beca, no hubiera llegado a estos niveles. Por lo que estoy profundamente agradecido con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), que da la oportunidad a jóvenes mexicanos que desean estudiar un posgrado de calidad y salir de su estado de confort y mas importante, de cultivar y germinar nuevos conocimientos para el estado del arte y ayudar a la sociedad.

Finalmente agradezco al Centro de Investigación e Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIIICA) y a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQI) por abrirme las puertas de su hogar y ser parte de su familia. Gracias infinitas, por todo lo que me enseñan día a día y ofrecerme la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos.

#Becarios Conacyt,

#FCQI

#BEBEBE

#Galaxy

Índice

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1.1 | ¿QUÉ SON LOS SISTEMAS MICROELECTROMECÁNICOS? | 13 |
| 1.2 | APLICACIONES Y TENDENCIAS DE LOS MEMS | 13 |
| 1.3 | OBJETIVO | 16 |
| 1.4 | JUSTIFICACIÓN | 16 |
| 1.5 | REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE..... | 17 |
| 1.5.1 | ÚLTIMOS AVANCES Y DESARROLLOS SOBRE EL ACTUADOR CHEVRÓN | 17 |
| 1.6 | ALCANCE..... | 23 |
| 1.7 | SOFTWARE UTILIZADO. | 23 |
| 1.8 | ORGANIZACIÓN DE LA TESIS. | 25 |
| 2. | MARCO TEÓRICO | 28 |
| 2.1. | ANÁLISIS ELECTROTÉRMICO | 28 |
| 2.2. | ANÁLISIS TRANSITORIO DE ACTUADORES | 32 |
| 2.2.1. | ESTADO ESTACIONARIO..... | 32 |
| 2.2.2. | CALENTAMIENTO | 33 |
| 2.2.3. | ENFRIAMIENTO | 35 |
| 2.3. | CONDICIONES DE FRONTERA PARA EL CÁLCULO DE FRECUENCIAS NATURALES | 36 |
| 2.4. | MÉTODO POR ELEMENTO FINITO (FEM)..... | 38 |
| 2.4.1. | BARRAS Y RESORTES | 39 |
| 2.4.2. | EQUILIBRIO EN NODOS..... | 40 |
| 2.1. | ANÁLISIS ELECTROMECAÁNICO DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN | 41 |
| 3. | METODOLOGÍA..... | 46 |
| 3.1. | METODOLOGÍA | 46 |
| 3.2. | ANSYS | 47 |
| 4. | DISEÑO DEL CANTILÉVER..... | 51 |
| 4.1. | ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | 51 |
| 4.1.1. | SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA..... | 51 |
| 4.1.2. | DETERMINACIÓN DE MATERIALES | 52 |
| 4.1.3. | SELECCIÓN DE COMPONENTES | 52 |
| 4.1.4. | DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES..... | 52 |
| 4.2. | DISEÑO PRELIMINAR DEL CANTILÉVER | 53 |
| 4.3. | RESULTADOS..... | 54 |
| 4.3.1. | RESULTADOS DE SIMULACIÓN | 54 |
| 4.4. | COMPARACIÓN | 57 |
| 4.4.1. | ESFUERZO Y DEFORMACIÓN | 57 |
| 4.4.2. | FRECUENCIA NATURAL Y SU FORMA MODAL | 58 |
| 4.4.3. | PARAMETRIZACIÓN DE FUERZA, DEFORMACIÓN Y ESFUERZO..... | 61 |
| 4.5. | ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO | 67 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.6. | DISPOSITIVO FINAL | 68 |
| 5. | DISEÑO DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN | 70 |
| 5.1. | ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | 70 |
| 5.1.1. | SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA..... | 70 |
| 5.1.2. | DETERMINACIÓN DE LOS MATERIALES | 70 |
| 5.1.3. | SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES | 70 |
| 5.1.4. | DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES..... | 70 |
| 5.2. | DISEÑO PRELIMINAR DEL CHEVRÓN..... | 71 |
| 5.3. | RESULTADOS..... | 72 |
| 5.3.1. | RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | 72 |
| 5.4. | COMPARACIÓN | 72 |
| 5.5. | ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO..... | 79 |
| 5.6. | DISPOSITIVO FINAL | 80 |
| 6. | DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZAS..... | 82 |
| 6.1. | ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | 82 |
| 6.1.1. | DETERMINACIÓN DE LA TECNOLOGÍA..... | 82 |
| 6.1.2. | DETERMINACIÓN DE LOS MATERIALES | 82 |
| 6.1.3. | SELECCIÓN DE COMPONENTES DE LA MICROPINZA | 82 |
| 6.1.4. | DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES..... | 83 |
| 6.2. | DISEÑO PRELIMINAR | 84 |
| 6.3. | RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN..... | 84 |
| 6.4. | COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO UTILIZANDO OTROS MATERIALES..... | 91 |
| 6.5. | DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA CON EL VOLTAJE APLICADO, UTILIZANDO SILICIO.. | 94 |
| 6.6. | ANÁLISIS DE FATIGA DE LA MICROPINZA DE SILICIO..... | 94 |
| 6.7. | ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO..... | 99 |
| 6.8. | DISEÑO FINAL | 100 |
| 7. | CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO | 102 |
| 6.9. | CONCLUSIONES | 102 |
| 6.10. | TRABAJO FUTURO | 104 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 106 |
| | ANEXO A: PROCESOS DE FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS MEM..... | 112 |
| A.1. | FABRICACIÓN DEL CIRCUITO INTEGRADO POLYMEMS-INAOE | 112 |
| A.2. | DESCRIPCIÓN SIMPLIFICADA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CHIP POLYMEMS VII. | 112 |
| A.3. | CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN POLYMUMPS | 117 |
| | ANEXO B. PUBLICACIONES | 129 |
| B.1. | ARTÍCULOS EN REVISTAS INDIZADAS | 129 |

| | |
|---|------------|
| B.2. ARTÍCULOS ACEPTADOS..... | 129 |
| B.3. CAPÍTULO EN LIBRO ACEPTADO | 130 |
| B.4. PUBLICACIONES EN MEMORIAS ARBITRADAS INTERNACIONALES | 130 |
| ANEXO C. RECONOCIMIENTO..... | 132 |
| ANEXO D. SOLICITUD DE PATENTE..... | 134 |
| ANEXO E. MICRODISPOSITIVOS ADICIONALES..... | 136 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1-1 DATOS RELEVANTES EN LA HISTORIA DE LOS MEMS | 14 |
| TABLA 1-2 DESCRIPCIÓN Y PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE ALGUNOS DISPOSITIVOS EN EL ESTADO DEL ARTE | 21 |
| TABLA 3-1 TABLA DE LAS CAPACIDADES DE ANÁLISIS DE ANSYS PARA UN RANGO DE APLICACIONES ESPECÍFICAS SEGÚN LOS MEMS | 48 |
| TABLA 4-1 TABLA DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO. | 52 |
| TABLA 4-2 TABLA COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DEL ESFUERZO, SIMULADO Y CALCULADO . | 57 |
| TABLA 4-3 FRECUENCIAS NATURALES DE LAS FORMAS MODALES DEL MICROANTILEVER A DIFERENTES LONGITUDES, USANDO SILICIO..... | 60 |
| TABLA 4-4 VALORES DE RIGIDEZ Y MASA CALCULADOS Y SIMULADOS. | 62 |
| TABLA 4-5 VALORES DE RIGIDEZ TEÓRICO Y SIMULADO CON SUS DESVIACIONES CORRESPONDIENTES..... | 66 |
| TABLA 5-1 TABLA DE RESULTADOS DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN EN 2D Y 3D | 73 |
| TABLA 6-1 TABLA DE RESULTADOS DE LA MICROPINZA..... | 85 |
| TABLA 6-2 FORMAS MODALES DE LA MICROPINZA CON SUS RESPECTIVAS FRECUENCIAS..... | 86 |
| TABLA 6-3 RESULTADOS DE MICROPINZAS MODIFICADAS ESTRUCTURALMENTE | 88 |
| TABLA 6-4 TABLA DE RESULTADOS DE LA MICROPINZA OPTIMIZADA..... | 90 |
| TABLA 6-5 TABLA DE RESULTADOS DE LA MICROPINZA OPTIMIZADA CON MATERIAL DE Ni_3Si_4 | 91 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1-1 PROYECCIÓN DEL MERCADO MEMS 2012 A 2019 (YOLE DEVELOPMENT, 2014)..... | 15 |
| FIGURA 1-2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN AL MICROACTUADOR CHEVRÓN | 18 |
| FIGURA 1-3 IMÁGENES DE APLICACIONES DE MICROACTUADORES CHEVRÓN POR A) (LUO, FLEWITT, SPEARING, & FLECK, 2005), B) (BARACU, Y OTROS, 2016), C) (WANG, ZHIHONG, MCCORMICK, & NORMAN, 2003) Y D) (CHEN, Y OTROS, 2009)..... | 21 |
| FIGURA 1-4 IMÁGENES DE MICROPINZAS DESARROLLADAS POR A) (SHI, Y OTROS, 2017), B) (FENG, CHEN, & HSIEH, 2016) C) (VELOSA-MONCADA, AGUILERA-CORTÉS, GONZÁLEZ-PALACIOS, RASKIN, & HERRERA-MAY, 2018) Y D) (AHMED BAZAZ, KHAN, & IQTIDAR SHAKOOR, 2011) .. | 23 |
| FIGURA 2-1 ELEMENTO BARRA EMPOTRADA EN UNA DE SUS EXTREMOS | 29 |
| FIGURA 2-2 MICROACTUADOR CANTILÉVER | 31 |
| FIGURA 2-3 VIGA EN VOLADIZO | 37 |
| FIGURA 2-4 ELEMENTO FINITO DE UNA BARRA O RESORTE CON DOS NODOS..... | 40 |
| FIGURA 2-5 MICROACTUADOR CHEVRÓN..... | 41 |
| FIGURA 2-6 A) DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA EL ANÁLISIS MATEMÁTICO POR FEM Y B) DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE CON UN GRADIENTE DE TEMPERATURA..... | 42 |
| FIGURA 3-1 METODOLOGÍA..... | 46 |
| FIGURA 3-2 INTEGRACIÓN DE ANSYS MULTIFÍSICA EN EL PROCESO DE DISEÑO DE LOS MICROSISTEMAS/MEMS. EN ESTE TRABAJO, SOLO SE ABORDA LA PARTE SOMBREADA, A LA QUE SE DENOMINA CAPACIDADES DE ANSYS MULTIFÍSICA. ADAPTACIÓN REALIZADA A PARTIR DE FUENTE: THEORY REFERENCE (ANSYS, 2006)..... | 47 |
| FIGURA 4-1 DISEÑO PRELIMINAR DEL CANTILÉVER..... | 53 |
| FIGURA 4-2 ÁRBOL PRINCIPAL DE SIMULACIÓN EN EL ESPACIO DE TRABAJO DE WORKBENCH | 54 |
| FIGURA 4-3 A) DEFORMACIÓN DEL CANTILÉVER CON UNA RESTRICCIÓN EN DESPLAZAMIENTO DE 2 μm B) ESFUERZO EJERCIDO EN EL MICROcantilever POR LA RESTRICCIÓN DE 2 μm | 56 |
| FIGURA 4-4 GRÁFICA DE LA EVALUACIÓN EN BARRIDO DE TEMPERATURA VS ESFUERZO | 57 |
| FIGURA 4-5 A) REPRESENTACIÓN VISUAL DE LA DEFORMACIÓN DEL DISPOSITIVO B) GRÁFICA DE LA EVALUACIÓN EN BARRIDO DE TEMPERATURA VS DEFORMACIÓN SIN RESTRICCIÓN | 58 |
| FIGURA 4-6 A) TOOLBOX PARA EL CÁLCULO MODAL B) ÁRBOL DE SIMULACIÓN, PREPROCESAMIENTO → PROCESAMIENTO → POSTPROCESAMIENTO | 59 |
| FIGURA 4-7 FORMAS MODALES DE LOS DISPOSITIVOS MICROcantilevers CON LONGITUDES EN A) $L_1 = 200 \mu\text{m}$, B) $L_2 = 250 \mu\text{m}$, C) $L_3 = 300 \mu\text{m}$, D) $L_4 = 350 \mu\text{m}$ Y E) $L_5 = 400 \mu\text{m}$ | 61 |
| FIGURA 4-8 GRÁFICA DE VALIDACIÓN A) BARRIDO EN TEMPERATURA VS DEFORMACIÓN CON LONGITUDES, 200 - 400 μm Y B) BARRIDO EN TEMPERATURA VS FUERZA DE DESPLAZAMIENTO.63 | |
| FIGURA 4-9 GRÁFICA A) BARRIDO EN TEMPERATURA VS ESFUERZO Y B) % DE ERROR ENTRE LOS VALORES CALCULADOS Y SIMULADOS | 64 |
| FIGURA 4-10 GRÁFICA A) BARRIDO EN GRADIENTE DE TEMPERATURA VS DEFORMACIÓN Y B) % DE ERROR ENTRE LOS VALORES CALCULADOS Y SIMULADOS DE LA DEFORMACIÓN, EN LOS MATERIALES Si, POLY Y Si ₃ N ₄ | 65 |
| FIGURA 4-11 GRÁFICA A) BARRIDO EN GRADIENTE DE TEMPERATURA VS FUERZA DE ACTUACIÓN DEL MICROcantilever Y B) % DE ERROR ENTRE LOS VALORES CALCULADOS Y SIMULADOS EN FUERZA. | 67 |

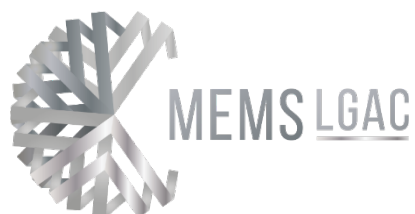

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5-1 MICROACTUADOR CHEVRÓN DE DOS BRAZOS. | 72 |
| FIGURA 5-2 A) MICROACTUADOR CHEVRÓN EN 2D Y B) RESPUESTA DE LA SIMULACIÓN DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN. | 73 |
| FIGURA 5-3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA EL ACTUADOR CHEVRÓN DE SILICIO DE 16 BRAZOS. | 75 |
| FIGURA 5-4 GRÁFICA DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN CON BRAZO $\angle 0.9^\circ$, A) BARRIDO EN TEMPERATURA VS DESPLAZAMIENTO Y B) BARRIDO EN TEMPERATURA VS FUERZA. | 77 |
| FIGURA 5-5 GRÁFICA DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN CON DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN, $\angle 1^\circ, 3^\circ$ Y 6° A) BARRIDO TEMPERATURA VS DESPLAZAMIENTO B) BARRIDO TEMPERATURA VS FUERZA. | 78 |
| FIGURA 5-6 DISEÑO FINAL DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN. | 80 |
| FIGURA 6-1 A) ALIMENTACIÓN POR UN POTENCIAL ELÉCTRICO EN EL MICROACTUADOR CHEVRÓN, B) DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN | 83 |
| FIGURA 6-2 A) DIMENSIONES DE LA MICROPINZA CON MICROACTUADOR CHEVRÓN Y B) ELEMENTOS DE AMORTIGUAMIENTO INTEGRADOS. | 84 |
| FIGURA 6-3 A) MALLADO DE LA MICROPINZA B) SIMULACIÓN DE LA MICROPINZA | 85 |
| FIGURA 6-4 DESCRIPCIÓN DE LA MICROPINZA MEJORADA | 90 |
| FIGURA 6-5 BARRIDO EN VOLTAJE VS TEMPERATURA. | 94 |
| FIGURA 6-6 STRESS-LIFE (S/N) COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UNA PELÍCULA POLICRISTALINA DE SILICIO DE $2 \mu\text{m}$ A 40 KHZ IN LABORATORY AIR (MUHLSTEIN ET AL., 2001A) Y (MULSTEIN & RITCHIE, 2003) | 95 |
| FIGURA 6-7 DETALLES DE LA CAJA DE ANÁLISIS DE LA HERRAMIENTA PARA EL DESARROLLO DEL ANÁLISIS POR FATIGA | 96 |
| FIGURA 6-8 A) ÁRBOL DE SIMULACIÓN DEL DISPOSITIVO B) CARACTERÍSTICAS DE SIMULACIÓN PARA EL SAFETY FACTOR. | 96 |
| FIGURA 6-9 A) ÁRBOL DE ASIGNACIÓN DE LA INDICACIÓN BIAXIAL B) ASIGNACIÓN DE LOS PORCENTAJE DE SENSIBILIDAD DEL DISPOSITIVO MICROMANIPULADOR | 97 |
| FIGURA 6-10 A) ÁRBOL DE ASIGNACIÓN DE LA INDICACIÓN BIAXIAL B) ASIGNACIÓN DE LOS PORCENTAJE DE SENSIBILIDAD DEL DISPOSITIVO MICROMANIPULADOR C) GRÁFICA DE CARGAS CÍCLICAS | 98 |
| FIGURA 6-11 DIMENSIONES DE LA MICROPINZA MEJORADA. | 100 |



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Se describen las partes fundamentales de esta tesis y los capítulos que la integran. Se presenta también una breve descripción de los dispositivos MEM, aplicaciones y tendencias. Con mayor profundidad, se describen los microactuadores Chevrón y las micropinzas.



1. Introducción

En este capítulo se describen algunos conceptos básicos, así como el entorno en que se desarrollan los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS). Se exhibe brevemente el estado del arte correspondiente al dispositivo bajo análisis y los capítulos que integran este trabajo.

1.1 ¿Qué son los Sistemas Microelectromecánicos?

Los MEMS son sistemas en la escala de los micrómetros que pueden integrar complejos elementos mecánicos, eléctricos, ópticos, electrónicos y otros más de manera monolítica en un solo sustrato o “microchip”. Así, cada micromáquina puede contener sensores, actuadores, circuitos de cómputo y procesamiento. Los sensores miden y proporcionan información de variables físicas, químicas, o biológicas del medio ambiente; los circuitos electrónicos procesan la información de los sensores y proveen soluciones y comandos de acción (toman decisiones); y finalmente los actuadores responden a los comandos de acción y manipulan el sistema o directamente el ambiente para obtener el resultado deseado (Santana & Verdezoto, 2011).

1.2 Aplicaciones y tendencias de los MEMS

Nacidos de la industria de los circuitos integrados, los MEMS hallan aplicaciones que van desde la instrumentación militar hasta la comercial (Santana & Verdezoto, 2011), constituyendo una industria de alto impacto económico, en particular, en países como Estados Unidos y Japón, así como en otros países del continente europeo y asiático (Caballero & Kang K., 2018.).

Algunos de los dispositivos MEM más investigados y utilizados son: interruptores, acelerómetros, **micro-pinzas**, sensores de presión, dispositivos micro-ópticos, giroscopios, microespejos, etc. Sus aplicaciones son muy variadas. Los dispositivos y sistemas MEM pueden formar parte de sistemas médicos, computacionales y de comunicaciones, entre otros. Las industrias

automotriz, biomédica, biotecnológica, petrolera y de la construcción, son algunas de las ramas de la economía de la que forman parte.

Entre los factores críticos en la implementación de dispositivos MEM, en los diversos escenarios mencionados, se encuentran el desempeño, la durabilidad de los empaques, las fuentes de alimentación (eficientes y de tamaño adecuado), la fabricación y los costos, entre otros.

En la Tabla 1.1 se muestra el avance de esta tecnología a partir del año de 1940 hasta nuestros días (Pelesko A. & Berstein H., 2003).

Tabla 1-1 Datos relevantes en la historia de los MEMS

| | |
|------|---|
| 1940 | El radar impulsa el desarrollo de los semiconductores puros. |
| 1959 | Richard P. Feynman cita en una de sus conferencias "Hay mucho espacio en el fondo". |
| 1960 | Se inventa el proceso de fabricación planar por lotes. |
| 1964 | H.C. Nathanson y un equipo de Westinghouse producen el transistor de compuerta resonante, el primer dispositivo MEMS fabricado por lotes. |
| 1970 | Se inventa el microprocesador y con ello se incrementa la demanda de circuitos integrados. |
| 1979 | Se desarrolla en la Universidad de Stanford el primer acelerómetro por micromaquinado. |
| 1982 | Se desarrolla el microscopio de escaneo por efecto túnel. |
| 1984 | Es desarrollado en la Universidad de California el proceso de micromecanizado superficial de polisilicio. Por primera vez, se pueden fabricar MEMS y circuitos integrados juntos. |
| 1986 | Se desarrolla el microscopio de fuerza atómica. |
| 1991 | Descubrimiento del nanotubo de carbón. |
| 1996 | Descubrimiento de una nueva técnica para la producción de nanotubos desarrollado por Smalley. |
| 1998 | Cerca de 27 millones de microacelerómetros fueron comercializados. |
| 2000 | El número de dispositivos y aplicaciones MEMS aumenta continuamente. |
| 2002 | Introducción de dispositivos analógicos, giroscopio ADXRS y primeras herramientas de nanoimpresión. |
| 2003 | Micrófonos MEMS para aplicaciones de volumen y primeras pruebas de osciladores MEMS. |
| 2004 | Las ventas de chips DLP de TI aumentaron a casi \$ 900 millones. |

| | |
|------|--|
| 2005 | Analog Devices envió 200 millones de sensores inerciales MEMS. |
| 2006 | Acelerómetros triaxiales empaquetados menores a 10 mm ³ llegan a estar disponibles. |
| 2006 | Giroscopios MEMS de ejes duales aparecen en el mercado. |

Una de las proyecciones en las inversiones para el desarrollo de dispositivos MEMS, es la proporcionada por Yole Development (Figura 1.1).

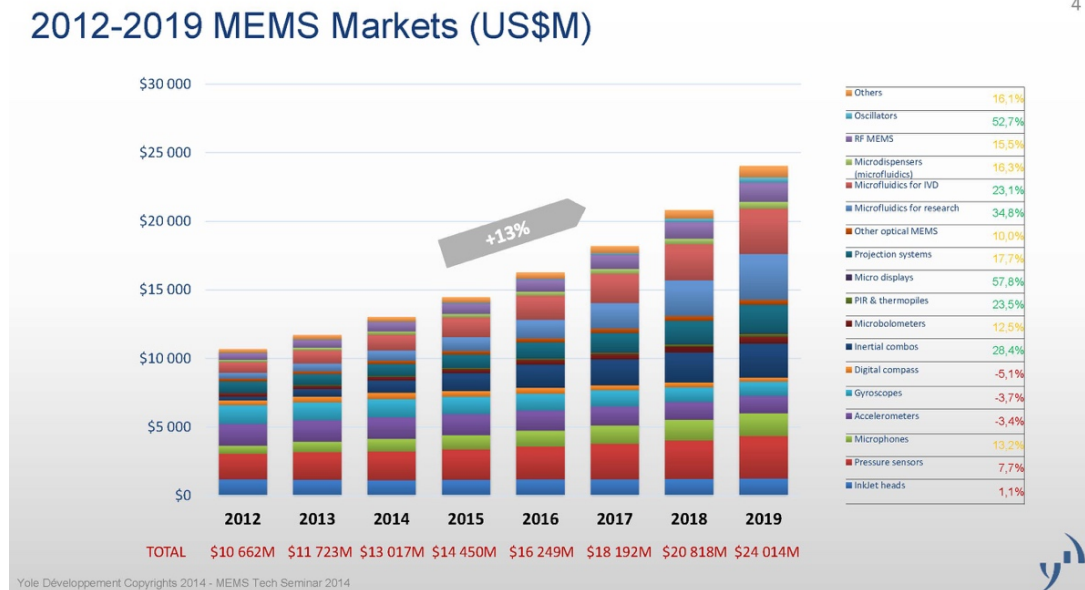


Figura 1-1 Proyección del mercado MEMS 2012 a 2019 (Yole Development, 2014)

En el trabajo aquí propuesto, iniciamos desde la comprensión del funcionamiento de un simple cantiléver hasta la integración de varios elementos estructurales o dispositivos microactuadores para formar una micropinza. En todo el trabajo analizamos el comportamiento mecánico y eléctrico de los dispositivos.

La importancia en el desarrollo de este proyecto, se basó en la integración y comprensión del uso de elementos simples para la formación de dispositivos micromanipuladores que generen amplios rangos en sus parámetros de operación y que utilicen una menor cantidad de material estructural para su fabricación. También se plantea la caracterización mecánica y eléctrica de

estos elementos micromanipuladores utilizando el Análisis por Elemento Finito (FEA) a través del software Ansys Workbench y APDL.

1.3 Objetivo

Diseñar y caracterizar una pinza electrotérmica, con optimización de parámetros estructurales: esfuerzo, formas modales, fuerza de sujeción, apertura y cierre de la pinza.

Objetivos particulares

- Realizar análisis dinámico del cantiléver y del actuador chevrón.
- Analizar los parámetros de desempeño del actuador chevrón.
- Caracterizar a la micropinza y realizar las pruebas de optimización necesarias.
- Desarrollar pruebas con otro material.

1.4 Justificación

Los MEMS, también conocidos como microsistemas o micromáquinas, son un conjunto de técnicas y procesos a nivel microescala, combinan componentes eléctricos y mecánicos utilizando Circuitos Integrados (IC) compatibles con técnicas de procesos por volumen. Su tamaño va desde los micrómetros hasta unos cuantos milímetros (MEMS, 1999).

El proceso de fabricación por micromaquinado da la posibilidad de que los MEMS sean utilizados en muchos campos de la ingeniería biomédica, la biología, la medicina (BioMEMS). Por lo que, utilizando la integración de arreglos de actuadores MEMS y sensores, pueden ser creados microsistemas complejos con la capacidad de controlar muchos parámetros (MEMS, 1999).

Los actuadores MEMS son generalmente diseñados para operar como switches, válvulas, bombas, generadores, filtros, manipuladores o pinzas, instrumentos para cirugía, agujas, microespejos y otros dispositivos a nivel microescala.

La micromanipulación es utilizada para el montaje, ensamblado y cuidado de micromáquinas y sus partes. En los últimos años, han tenido un avance importante en sectores como la robótica, la biología, la microelectrónica, entre otros. Sobre todo en donde se efectúa manipulación y transporte de objetos mecánicos, electrónicos y biológicos con una alta precisión y confiabilidad.

Por ello la importancia en desarrollar dispositivos cada vez más eficientes y con amplios rangos o robustez en su operación, principalmente en la reducción del uso de elementos estructurales en su fabricación, en la apertura y en el cierre de las pinzas, así como, en desarrollar modelos mecánicos y eléctricos que caractericen su comportamiento (Park, y otros, 2010).

El principio de operación de estas micropinzas se basan fundamentalmente en fuentes de excitación electrostáticas, piezoeléctricas, electrotérmicas, ópticas o por memoria de forma (Jamshid, 2013).

Entre los materiales más utilizados para su fabricación están el Silicio (Si), el polímero SU-8, el Aluminio (Al), el Níquel (Ni), el Titanio (Ti), Arsenuro de Galio (GaAs), Nitruro de Silicio, entre otras. Los procesos de fabricación en donde normalmente han sido elaborados estos elementos son el micromaquinado superficial, el micromaquinado de cuerpo y las técnicas de LIGA (Litografía de rayos X).

1.5 Revisión del estado del arte

1.5.1 Últimos avances y desarrollos sobre el Actuador Chevrón

Uno de los dispositivos que han sido ampliamente diseñados, analizados e implementados en sistemas complejos de microsistemas son los microactuadores tipo V o microactuadores Chevrón. Estos dispositivos están integrados por un par de anclas, una flecha central con brazos extendidos unidos a las anclas, como se puede observar en la Figura 1.2.

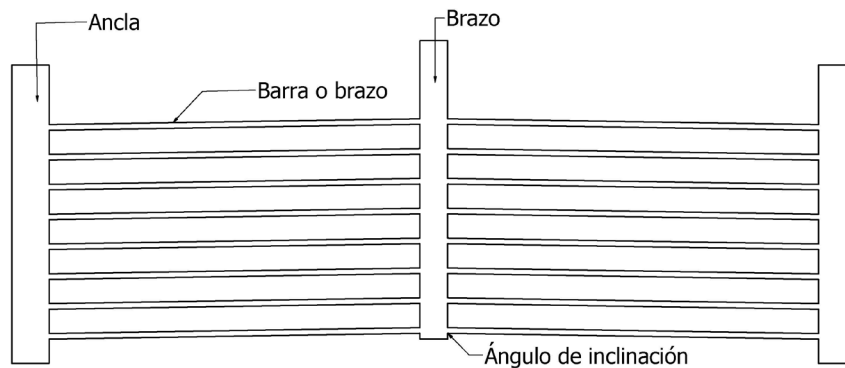


Figura 1-2 Elementos que integran al microactuador Chevrón

En (Sinclair, 2010) y (Girbau, Lazaro, & Pradell, 2003), presentan una estructura chevrón MEM, la cual es alimentada por una diferencia de potencial. Adicionalmente, agregan un conductor flexible tipo resorte en la parte inferior de la flecha del dispositivo para incrementar el desplazamiento, mientras que en el segundo artículo el mismo dispositivo es aplicado como un switch RF. En los artículos de (Maloney, Devoe, & Schreiber, 2000), (Craig, 2010), (Luque & Nihtanov, 2018), (Phinney, Baker, & Justin, 2012) y (Varona, Tecpoyotl-Torres, & Hamoui, 2007) realizan el diseño, fabricación, caracterización, modelado y rentabilidad entre un actuador V-beam y un actuador U-beam, sobre el comportamiento térmico debido a una fuente de voltaje, proponen una ecuación para describir el desplazamiento y la fuerza de actuación de los dispositivos y utilizan como material de fabricación el silicio. En la tesis de (Szabo, 2004) se desarrolla todo el análisis anteriormente mencionado, pero con la diferencia de que al dispositivo chevrón lo utilizan como un actuador opto-electrotérmico en la fabricación combinan oro-silicio.

En (Long, Jae-Sung, & Yogesh, 2001) y (Ando, Baglio, Savalli, & Trigona, 2011) se realiza una aplicación del microactuador chevrón en cascada con una estructura de dos brazos, con el objeto de amplificar el desplazamiento del dispositivo. Otra aplicación se muestra en (Wang, Zhihong, McCormick, & Norman, 2003), donde la actuación electrotérmica al ser estimulada por una diferencia de potencial a un dispositivo chevrón de dos brazos, se utiliza como

microrelay RF, donde el material de fabricación es el silicio. (Luo, Flewitt, Spearing, & Fleck, 2005) propone una modificación del actuador chevrón a un micro-resorte el cual realiza arreglos de micro-resortes fabricados con SiO₂, para mejorar el desplazamiento.

Por otra parte, el acoplamiento entre el actuador V y U lo aplican para desarrollar una micropinza MEM. Mientras tanto en (Hussein, y otros, 2015) y (Enikov, Kedar, & Lazarov, 2005) presentan un modelado numérico para calcular el desplazamiento del dispositivo en dos brazos a partir de una diferencia de potencial. Posteriormente, en el libro (Lobontiu & Garcia, 2005) en el capítulo 4 y en el artículo (Chiorean, Dudescu, Marius, & Mihail, 2014), proponen explicar el desplazamiento y la fuerza de actuación del dispositivo chevrón con *el teorema Castigliano*, debido al efecto de expansión térmico en los brazos del chevrón.

El trabajo desarrollado en (Espinosa, Yong, & Nicolaie, 2007) describe el diseño, fabricación y operación de un dispositivo chevrón como sensor basado en nanoestructuras y utilizan el proceso de fabricación poly-MUMPs. Otra de las aplicaciones que se le da al dispositivo chevrón es el mostrado en (Caglar, Lin, Ren, Mustafa, & Khamesee, 2008) al modelar, simular y caracterizarlo como un microactuador foto-térmico utilizando material polimérico (SU-8) y simulado en Ansys. Mientras que en (Sassen, Henneken, Tichem, & Sarro, 2008) el actuador chevrón es aplicado para la alineación de una fibra óptica, estimulada por una diferencia de potencial (34 V-45 V). En los artículos (Chen, y otros, 2009) y (Baracu, y otros, 2016) se modela, diseña y fabrica un actuador Bi-chevrón de nitruro de aluminio para micro-válvulas de alta presión, colocando dos chevrón en paralelo, para obtener desplazamientos asimétricos, en el segundo artículo el dispositivo es modelado y diseñado para aplicaciones microswitch, la simulación la desarrollaron en Ansys y MEMSCAP.

En el libro presentado por (Kaajakari, 2009), se describen las ecuaciones que explican el desplazamiento, fuerza de actuación y el comportamiento transitorio del actuador chevrón a partir de la ecuación de difusión del calor. A este mismo actuador en (Guan & Zhu, 2010) y (Ho Kwan, Sichao, & Xing, 2011), se le implementan barras o brazos tipo Z, en donde se desarrollan de manera detallada las ecuaciones involucradas en desplazamiento y fuerza de actuación siguiendo el método de la energía generada por el voltaje aplicado. Cabe señalar que los brazos no tienen un ángulo de inclinación, en el segundo artículo desarrollan el modelado, diseño y fabricación de un actuador chevrón electro-térmico, alimentado por voltaje con barras uniformes y no-uniformes. La siguiente aplicación se realiza en los siguientes artículos (Suneat, Holmes, Robertson, & Stepan, 2006), (Ehad, Ayman, & Foulds, 2012) y (Jain, Sharma, & Kumar, 2013), al proponer un nuevo diseño de switch MEMS, el cual tiene cinco estados de accionamiento partiendo de la actuación térmica y fuerza electrostática, en el tercer artículo el chevrón es utilizado como un actuador tipo micropinza bidireccional estimulado por voltaje, simulado en Comsol Multiphysics y con material de polisilicio. Finalmente, se analiza el comportamiento del chevrón con diferentes materiales debido al efecto residual de la deformación provocado por el voltaje. Una aplicación interesante de este dispositivo chevrón se da en (Huang & Yang, 2012) al modelar, simular y caracterizar un innovador switch óptico monolítico con atenuadores de variables ópticos, con una eficiencia del 10 % con respecto a resultados simulados y experimentales.

En la gran mayoría de los casos, se han presentado las múltiples aplicaciones de los microactuadores chevrón siendo un dispositivo altamente confiable y adaptable a diferentes áreas del conocimiento. En la Figura 1.3, se pueden observar algunos de los microactuadores chevrón extraídos de algunas de las referencias del estado del arte.

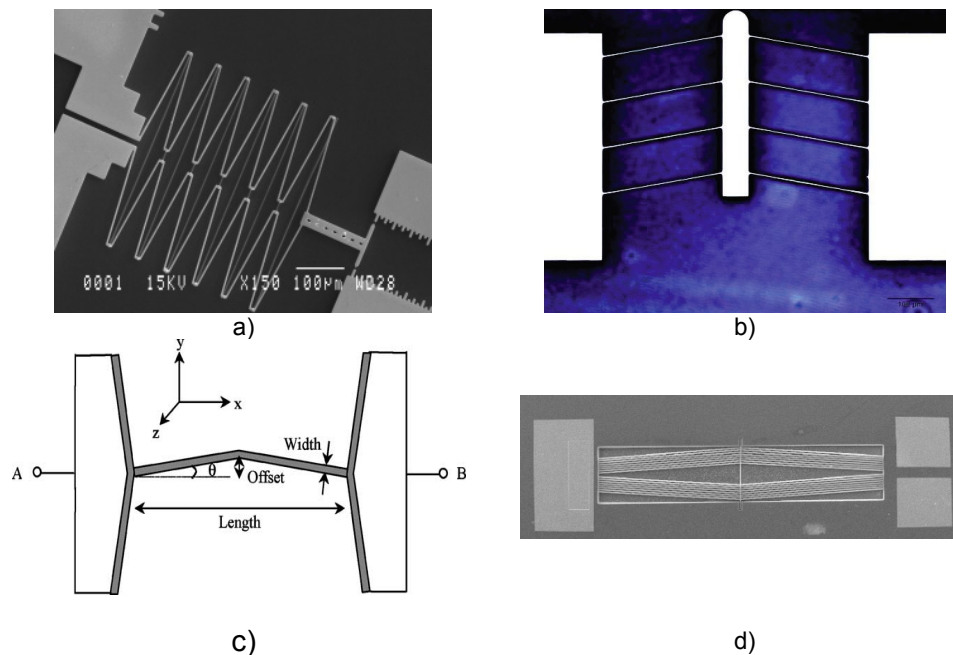


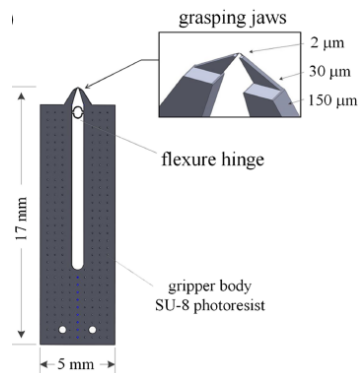
Figura 1-3 Imágenes de aplicaciones de microactuadores Chevrón por a) (Luo, Flewitt, Spearing, & Fleck, 2005), b) (Baracu, y otros, 2016), c) (Wang, Zhihong, McCormick, & Norman, 2003) y d) (Chen, y otros, 2009)

En la Tabla 1.2, se presenta una revisión del estado del arte sobre los avances e investigaciones de micropinzas y sus posibles aplicaciones. En esta tabla se describen los parámetros fundamentales que muchos autores consideran para su aplicación. Así mismo, estos parámetros sirvieron de referencia para la caracterización de nuestros dispositivos.

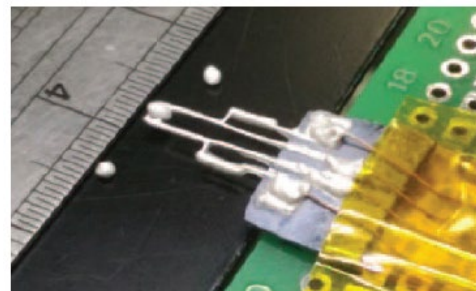
Tabla 1-2 Descripción y parámetros fundamentales de algunos dispositivos en el estado del arte

| Descripción | Desplazamiento o apertura (μm) | Fuerza (μN) | Dimensiones (μm) | Material | Alimentación | Referencia |
|--|---|--------------------------|---------------------------------|----------|--------------|----------------------------|
| Micropinza electrotérmica con microactuador chevrón | 1.39 | N/A | $\sim 102 \times 35 \times 1$ | Niquel | 28 mA | (Won, y otros, 2010) |
| Micropinza con microactuador chevron rotado a 90° | 42 | N/A | $\sim 772 \times 350 \times 10$ | Silicio | 100 mW | (See-Ho, Dan, & M., 2006) |
| Micropinza para manipulación de células | 37 | N/A | $\sim 1000 \times 80 \times$ | SU-8/Oro | 45 V | (Iamoni & Soma, 2014) |
| Micropinza con microactuador chevrón y compliant | 80 | ~ 200 | $2900 \times 3500 \times 45$ | SU-8 | 53 mV | (Chu, Zhang, & Chen, 2011) |

| | | | | | | |
|--|--------------|--------|---------------------|--------------|---|---|
| Micropinza actuado neumáticamente | 120 | 10000 | 75000 x 10000 x 360 | SU-8-SMA | 400 mbar | (Volker, Sebastian, & Stephanus, 2002) |
| Optimización de los elementos compliant de una Micropinza | 40 | N/A | ~ 6000 x 1000 x 100 | Polisilicio | 3 V | (Tsai, Lei, & Sudin, 2005) |
| Micropinza con fuerza controlada | 67 | 0.0385 | N/A | Silicio | 10 V | (Kim, Liu, Zhang, & Sun, 2008) |
| Micropinza electrostática con sensor de fuerza capacitiva | 70 | 190 | ~1125 x 900 x 50 | Silicio | 120 V | (Jia & Xu, 2013) |
| Micropinza para tejidos | 14.2 - 40.8 | | 2000 x 2000 x 80 | Silicio | 1.5 - 3 V | (Mackay & Le, 2008) |
| | 30.8 - 153.4 | | | Niquel | 0.05-0.2 V | |
| Micropinza electrostática con sensor de fuerza capacitivo | 70.88 | 190 | ~6900 x 6500 x 500 | Silicio | 120 V | (Jia, Jia, & Xu, 2014) |
| Micropinza tipo electródo polimérico | 50 - 150 | N/A | 1500 x 100 x 50 | SU-8/Oro | 2 V | (Daunton, Gallant, Wood, & Katak, 2011) |
| Micropinza con 6 grados de libertad | 5 | N/A | 17000 x 5000 x 150 | SU-8/PZT | 10 V | (Shi, y otros, 2017) |
| Micropinza electotérmica | 310.6 | N/A | ~13500 x 2500 x 180 | Plata/Níquel | 0.26 A | (Feng, Chen, & Hsieh, 2016) |
| Micropinza electrostática con sensor capacitivo | 17 | N/A | 5003 x 6500 x 25 | Silicio | 50 V | (Ahmed Bazaz, Khan, & Iqtidar Shako, 2011) |
| Micropinza con dos chevrones in plane | 19.2 | 37000 | ~ 870 x 200 x 10 | Polisilicio | 0-1.2 V | (Shivhare, Uma, & M. Umapathy, 2015) |
| Micropinza con elemento rotatorio para aplicaciones biomédicas | 40 | N/A | 3860 x 50 x | Polisilicio | 23.4-129.2 V con una frecuencia de 463.8 Hz | (Velosa-Moncada, Aguilera-Cortés, González-Palacios, Raskin, & Herrera-May, 2018) |
| Micropinza de memoria de forma | 200 | N/A | ~4500 x 200 x 150 | TiNi | 100 °C | (Fu & Du, 2003) |



a)



b)

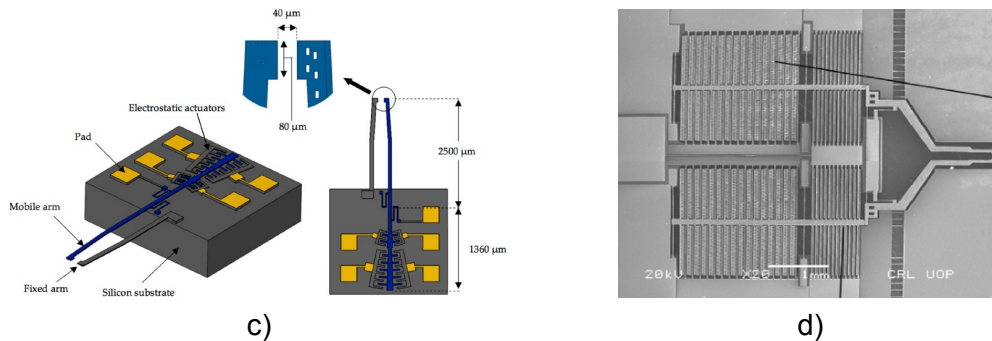


Figura 1-4 Imágenes de micropinzas desarrolladas por a) (Shi, y otros, 2017), b) (Feng, Chen, & Hsieh, 2016) c) (Velosa-Moncada, Aguilera-Cortés, González-Palacios, Raskin, & Herrera-May, 2018) y d) (Ahmed Bazaz, Khan, & Iqtidar Shakoor, 2011)

1.6 Alcance

En este trabajo, se analizará el comportamiento de los parámetros de desempeño del microactuador chevrón y optimizarlos, para posteriormente, implementarlos en una micropinza.

Con el conocimiento de las características de operación de los dispositivos, las características mecánicas y eléctricas de los materiales, el conocimiento de las ecuaciones fundamentales de operación de los microactuadores básicos, procedemos a diseñar, analizar e implementar nuevas micropinzas.

En este trabajo de investigación se presenta el desarrollo de una micropinza. Cabe señalar que, además se realizaron diseños adicionales de otros dispositivos, con la finalidad de preparar componentes útiles en el diseño de la micropinza. Se prepararon también diseños alternos de micropinzas, para seleccionar a la de mejor desempeño o más novedosa, ya sea por sus elementos o principio de operación.

Se eligió a unas de las micropinzas diseñadas y analizadas por FEA para su fabricación por tecnología SOI (Silicio sobre Aislante) en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).

1.7 Software utilizado.

Para la realización de las simulaciones por FEA se emplearon las siguientes herramientas:

- **ANSYS.** Es un software que sirve para predecir cómo funcionarán y reaccionarán determinados productos bajo un entorno real. Está desarrollado para funcionar con la teoría del elemento finito dedicado a estructuras y volúmenes finitos en fluidos. En el análisis estructural se despliegan otras herramientas, de las cuáles utilizamos al:
 - *Análisis estructural:* Donde las cargas aplicadas y las condiciones fijas del cuerpo sólido no cambian con el tiempo.
 - *Análisis modal:* En esta herramienta se desarrolla el cálculo de frecuencias naturales y formas modales.
 - *Análisis armónico:* Aquí se evalúa el comportamiento sinusoidal en el tiempo de una estructura sujeta a cargas.
- **Comsol Multiphysics.** (antes conocido como FEMLAB) es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos.

De las herramientas utilizadas para el Diseño Asistido por Computadora (CAD) en la elaboración de los dispositivos Microelectromecánicos se encuentran:

- **Autodesk Inventor.** Es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D producido por la empresa de software Autodesk.
- **SolidWorks.** Es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows.
- **Design modeler de Ansys Workbench.** Una herramienta adicional en Ansys Workbench para realizar diseño CAD, que facilita la parametrización y obtención de los resultados de manera confiable y rápida, de los diseños a través de FEA.

1.8 Organización de la tesis.

Este trabajo se compone de 5 capítulos bajo la siguiente estructura:


- **Primer capítulo:** Se presenta la introducción, el estado del arte de los dispositivos Chevrón y las micropinzas.
- **Segundo capítulo:** Se presenta el marco teórico que describe el modelado eléctrico y mecánico de los microcantiléver, del microactuador Chevrón y de las micropinzas.
- **Tercer capítulo:** Se describe la metodología propuesta para realizar los diseños de los componentes base, así como a la micropinza.
- **Cuarto capítulo:** Se muestra el diseño del micro cantiléver, con base en la metodología. Se analiza además la factibilidad de uso de 3 materiales semiconductores.
- **Quinto capítulo:** Se desarrolla el diseño del microactuador Chevrón. De nueva cuenta, se analiza su implementación considerando a 3 materiales semiconductores.
- **Sexto capítulo:** Aquí se presenta el diseño de la micropinza preliminar, así como su evolución, hasta llegar al diseño final.
- **Anexo A:** Se anexan fotografías de algunos dispositivos ya fabricados, además, se describen dos de los procesos de fabricación comunes en la fabricación de MEMS.
- **Anexo B.** Se presentan las publicaciones en las que se colaboró durante el desarrollo de la tesis y las directamente relacionadas con este trabajo.
- **Anexo C:** Se muestra el reconocimiento obtenido por la colaboración en el diseño de una nueva geometría de brazo de acelerómetros.
- **Anexo D:** Se muestra el comprobante de registro de la solicitud de patente ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, IMPI. La

micropinza basada en el pandeo de cantiléver, fue derivada de este trabajo.

- **Anexo E:** Se presentan imágenes de otros microdispositivos adicionales, diseñados a lo largo de este trabajo.

En este capítulo se ha proporcionado conocimiento básico sobre los MEMS, que permite observar su alto impacto en el desarrollo tecnológico, así como comercial.

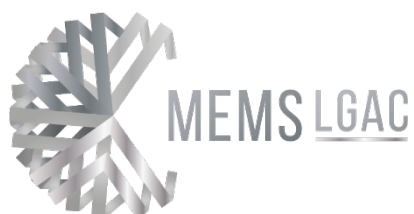
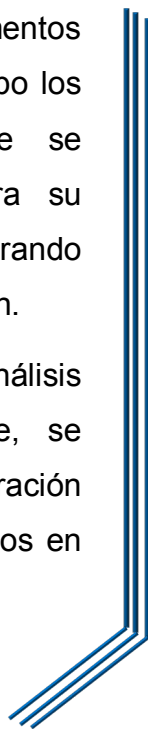
Además, con base en la revisión del estado del arte, se identifican áreas de oportunidad para el diseño de nuevos modelos de micropinzas, que puede incluir combinaciones de elementos básicos diferentes a las mostradas.



CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo, están los elementos teóricos básicos para llevar a cabo los diferentes análisis a los que se someterán los dispositivos para su caracterización, considerando diferentes regímenes de operación.

Al adaptar y aplicar los análisis correspondientes, posteriormente, se obtendrán los parámetros de operación pertinentes de los microdispositivos en los que se enfoca este estudio.



2. Marco teórico

Debido a que se plantean, como elementos básicos de interés para el diseño de la micropinza, tanto a los cantiléver, como a los actuadores Chevrón, es que los análisis se enfocarán en estos dispositivos. Cabe señalar que los análisis teóricos sobre los principios físicos en los que se basan, así como de su respuesta ante diversas condiciones, ha sido ampliamente analizada en la literatura, en muchas ocasiones de manera individualizada.

2.1. Análisis electrotérmico

Una parte del análisis de los microsistemas se centra en su comportamiento eléctrico, donde a partir del suministro de un voltaje o potencial eléctrico, se originan magnitudes físicas, como la potencia, la intensidad de corriente eléctrica y los gradientes de temperatura.

Además, para evaluar el comportamiento eléctrico del dispositivo, es importante conocer las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales de los que se componen los dispositivos.

Para realizar el cálculo de la potencia disipada en los dispositivos se hace uso de la ecuación 1:

$$P = VI \rightarrow V = IR \rightarrow R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Donde:

P = Potencia [W]

V = Voltaje [V]

I = Intensidad de corriente eléctrica [A]

ρ = Resistividad, parámetro localizada en Tablas [Ωm]

L = longitud del elemento de análisis [m]

A = Sección transversal del elemento de análisis [m^2]

R = Resistencia [Ω]

Por otra parte, en el análisis mecánico correspondiente a una barra empotrada en uno de sus extremos, comúnmente llamada cantiléver (Figura 2.1.), es necesario determinar su deformación, debida al cambio de temperatura, (Pelesko A. & Berstein H., 2003).

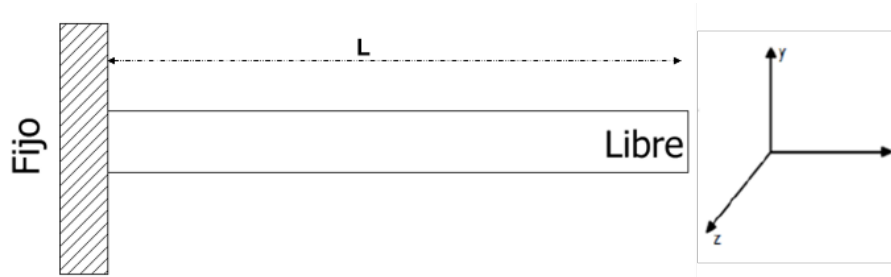


Figura 2-1 Elemento barra empotrada en una de sus extremos

Por las condiciones de la barra, el vector desplazamiento se expresa como:

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Asumiendo que la barra es muy delgada, se implica que $u_1 = u_1(x, t)$, donde t es el tiempo.

La temperatura es también una función, $T = T(x, t)$. Asumiendo una fuente de calor temporalmente uniforme y espacial, que actúan dentro de la barra, produciendo calor q , empleando la teoría cuasiestática y eliminando el esfuerzo en favor del desplazamiento se tienen las siguientes relaciones:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \alpha \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

Donde c_p , k , ρ , α , λ y μ son el calor específico a un presión constante, la conductividad térmica, la densidad, el coeficiente de expansión térmica y las constantes de *Lame*, respectivamente.

Asumiendo la condición de frontera:

$$u_1(0, t) = 0, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x}(L, t) = 0 \quad (5)$$

Si la temperatura de las paredes y del medio ambiente están fijas en T_0 , las condiciones de frontera son:

$$T(0, t) = T_0, \quad T(L, t) = T_0 \quad (6)$$

Asumiendo que inicialmente, la barra está a una temperatura T_0 :

$$T(x, 0) = T_0 \quad (7)$$

La ventaja del acoplamiento termoelástico es que las ecuaciones para el desplazamiento y la temperatura pueden resolverse independientemente. Si integramos dos veces la ecuación 4 y usamos las condiciones de frontera se determina:

$$u_1(x, t) = \alpha \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+2\mu} \int_0^x T(z, t) dz - \alpha \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+2\mu} T_0 x \quad (8)$$

Evaluando la ecuación 8, en $x = L$, tenemos:

$$u_1(L, t) = \alpha \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+2\mu} \int_0^L T(z, t) dz - \alpha \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+2\mu} T_0 L \quad (9)$$

Donde los valores de las constantes de *Lame* son:

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ y } \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (10)$$

Donde E es el Módulo de Young y ν la Razón de Poisson.

Evaluando la integral de la ecuación 9, se obtiene:

$$u(L) = \alpha \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+2\mu} L(T - T_0) \quad (11)$$

Asumiendo que no hay contracciones laterales de la barra, la razón de Poisson se descarta, por lo tanto, la ecuación se simplifica a:

$$u(L) = \alpha L(T - T_0) \quad (12)$$

De tal manera que, al final de la barra, por ejemplo, en el punto $x' = L$, el desplazamiento o deformación es entonces:

$$u(L) = \alpha L(T - T_0) \text{ o } u(L) = \delta_T = \alpha L \Delta T \quad (13)$$

Para el cálculo de la fuerza mecánica, se hace uso de la ley de Hooke:

$$F = -kx \quad (14)$$

F = Fuerza [N]

k = Constante de rigidez [N/m]

x = Desplazamiento unidireccional [m]

El signo menos se debe a la representación de la fuerza de restauración ejercida (Jithendra Prasad & Shameem, 2016).

Para el cálculo de la densidad de corriente eléctrica J hacemos uso de la ecuación:

$$J = \left(\frac{1}{\rho}\right) E \quad (15)$$

Donde:

ρ = Resistividad [Ωm]

E = Campo eléctrico = $\Delta V / L$ [V/m]

ΔV = Incremento de Voltaje

Para el caso en que el dispositivo es restringido por una pared o elemento limitador del movimiento direccional en el eje X, Figura 2.2. A continuación, se describen las ecuaciones.

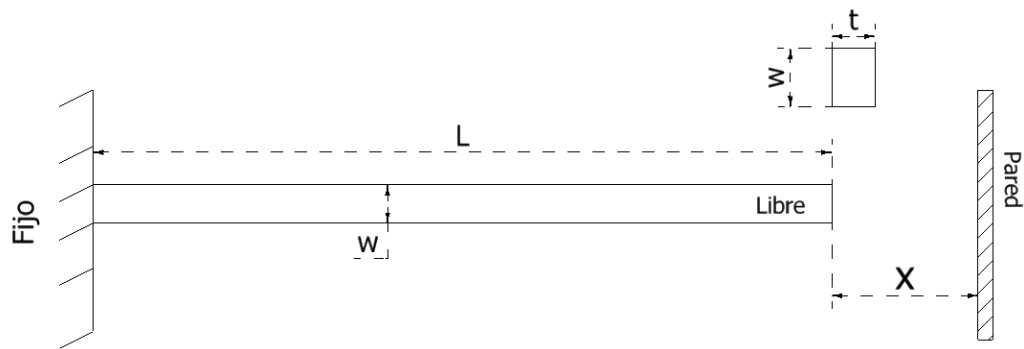


Figura 2-2 Microactuador cantiléver

Para dicha condición, el esfuerzo debido a la contribución de la pared se calcula a partir de:

$$\delta_T = x + \delta_\sigma \rightarrow \alpha l \Delta T = x + \frac{PL}{EA} \quad (16)$$

Entonces

$\sigma_{xx} = \frac{P}{A}$ sustituyendo $\alpha l \Delta T = x + \frac{\sigma_{xx} L}{E}$ y resolviendo para σ_{xx} se obtiene:

$$\sigma_{xx} = \alpha E \Delta T - \frac{x E}{L} \quad (17)$$

La Ley de Stoney también es ampliamente útil, se utiliza para calcular y analizar la desviación del micro cantiléver partir de los parámetros del material y el grosor del dispositivo:

$$\delta = \frac{3\sigma(1-\nu)}{E} (1 - t^2) \quad (18)$$

Donde σ es stress (esfuerzo), y δ es la deflexión.

Además, la ecuación de la constante del resorte (Suryansh, Sumati, Arti, & P.J., 2012) puede ser también requerida:

$$k = \frac{F}{\rho} = \frac{4wt^3}{4L^3} \quad (19)$$

Donde F es la fuerza aplicada.

2.2. Análisis transitorio de actuadores

En esta sección, se desarrollará la descripción del origen de las ecuaciones de enfriamiento y calentamiento del dispositivo chevrón, partiendo del estado estable, al ser sometido a un gradiente de temperatura ΔT . El análisis se encuentra soportado por (Kaajakari V. , 2009).

2.2.1. Estado estacionario

Se asume que el actuador es calentado por una potencia de calor uniforme por unidad de longitud $P_L = P/L$ donde P es la potencia de calor generado en

la mitad del actuador y L es la longitud de un brazo del chevrón, la potencia de calor en la dirección x se puede expresar de la siguiente forma:

$$\dot{W} = P_L x = \frac{P}{L} x \quad (20)$$

En el estado estacionario, esta energía fluye al exterior del actuador. El flujo de calor a lo largo de X puede llegar a ser igual al descrito por la ecuación 18.

Sin embargo, el flujo de calor es determinado con mayor precisión por la ecuación de difusión térmica,

$$\dot{W} = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (21)$$

Donde κ es la conductividad térmica y A es el área de la sección transversal. Igualando las ecuaciones 20 y 21 para balancear la entrada y salida de calor, y resolviendo en términos de temperatura nos da:

$$T(x) = \frac{P}{2\kappa AL} (L^2 - x^2) = T_{MAX} \frac{L^2 - x^2}{L^2} \quad (22)$$

Donde $T(x)$ es la temperatura relativa en las anclas del actuador. El cambio máximo de temperatura en el centro del actuador es:

$$T_{MAX} = \frac{PL}{2\kappa A}. \quad (23)$$

Integrando la deformación térmica $S_{xx} = \alpha \Delta T \rightarrow \int (S_{xx} = \alpha \Delta T) dx \therefore S(x) = \alpha \Delta T(x)$ a través de la longitud L obtenemos el cambio de longitud de la siguiente ecuación:

$$\Delta L = \int_0^L \alpha T(x) dx = \alpha T_{MAX} \frac{L^3 - L^3/3}{L^2} = \alpha T_{MAX} \frac{2L}{3}. \quad (24)$$

2.2.2. Calentamiento

En el análisis transitorio de calentamiento y enfriamiento se requiere hacer uso de la ecuación de difusión de calor dependiente del tiempo.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{P_v}{\rho c_p}. \quad (25)$$

Donde P_v es la potencia de calentamiento por unidad de volumen, c_p es la capacidad calorífica y ρ es la densidad del material. La solución de la ecuación 25 se realiza por medio de series de Fourier. Sin embargo, se tomará una propuesta aproximada para obtener la expresión del cálculo de calentamiento y enfriamiento del dispositivo. La aproximación más simple para obtener la solución del calentamiento es asumiendo que la distribución de la temperatura está dada por la ecuación 26:

$$T(x, t) = T(x)u(t) = T_{MAX} \frac{L^2 - x^2}{L^2} u(t). \quad (26)$$

Donde $T(x)$ es la distribución de la temperatura en la geometría dada por la ecuación 22 y $u(t)$ es todavía una incógnita que es dependiente del tiempo. Para encontrar esta incógnita dependiente del tiempo, lo desarrollaremos en dos pasos: primero calcularemos el flujo de calor total que entra en el sistema,

$$P_{net} = P - P_{out}. \quad (27)$$

Donde P es la energía de calentamiento o potencia de calentamiento y P_{out} es el calor disipado del sistema. El segundo paso es proponer que la difusión térmica será igual al flujo de calor total, $\dot{W} = P_{net}$. Por lo que, la potencia de calentamiento que entra al sistema será P y el calor generado en la ubicación $X = L$, de las ecuaciones 21 y 26 será de la siguiente manera:

$$\dot{W}|_{x=L} = -\kappa A \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = -T_{MAX} \frac{2\kappa A}{L} u(t). \quad (28)$$

Al combinar el flujo de calor interno y el disipado, la ecuación del flujo total de calor se convierte en:

$$\dot{P}_{net} = P - T_{MAX} \frac{2\kappa A}{L} u(t). \quad (29)$$

De esta manera la energía térmica se relaciona con la temperatura de acuerdo con la ecuación $\Delta W = c_p \rho V \Delta T$. Por lo tanto, la energía térmica por unidad de longitud dL será $dW(x) = c_p \rho T(x) A dL$. Integrando la ecuación de la energía calorífica en toda la longitud L , obtenemos:

$$W = \frac{2}{3} T_{MAX} c_p \rho A L u(t). \quad (30)$$

La razón de cambio de la energía calorífica es la derivada con respecto al tiempo de la ecuación 30,

$$\dot{W} = \frac{2}{3} T_{MAX} c_p \rho A L \dot{u}(t). \quad (31)$$

La ecuación 29 y 31 origina una ecuación diferencial para la razón de cambio de la energía calorífica $\dot{W} = P_{net}$:

$$P - T_{MAX} \frac{2\kappa A}{L} u(t) = \frac{2}{3} T_{MAX} c_p \rho A L \dot{u}(t). \quad (32)$$

Una solución satisfactoria de la ecuación 30 es:

$$u(t) = 1 - e^{-\lambda_h t}. \quad (33)$$

Donde

$$\lambda_h = \frac{3\kappa}{\rho c_p L^2}. \quad (34)$$

Por lo que $1/\lambda_h$ está definida como **el tiempo de calentamiento del dispositivo**.

En resumen, la cantidad de temperatura aproximada durante el ciclo de calentamiento es:

$$T(x, t) = T(x)u(t) = T_{MAX} \frac{L^2 - x^2}{L^2} (1 - e^{-\lambda_h t}). \quad (35)$$

Además,

$$\Delta L(t) = \Delta L (1 - e^{-\lambda_h t}). \quad (36)$$

Donde ΔL está dada por la ecuación 24.

2.2.3. Enfriamiento

El enfriamiento es también representado por la ecuación de difusión del calor.

Sin calentamiento, la ecuación 25 se simplifica a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (37)$$

Las condiciones iniciales están dadas por la ecuación 22. Cabe señalar que, la solución exacta requiere del uso de series de Fourier. Al aplicar las condiciones iniciales, resulta que:

$$T(x) = T_{MAX} \cos \frac{\pi x}{2L} . \quad (38)$$

En la ecuación 38, el término $\cos \frac{\pi x}{2L}$ es la función base para el primer término de la serie de Fourier.

En este caso, el $\cos \frac{\pi x}{2L}$ disminuye la exactitud e incluye términos en la serie de Fourier de órdenes altos, que no afectan significativamente los resultados.

Por ello, sustituyendo $T(x, t) = T(x)u(t)$ en la ecuación 37 y resolviendo para $u(t)$ obtenemos:

$$u(t) = e^{-\lambda_c t} \quad (39)$$

Donde

$$\lambda_c = \frac{\pi^2 \kappa}{4\rho c_p L^2} \quad (40)$$

La **constante de tiempo para el enfriamiento** es aproximadamente igual a la constante de tiempo del calentamiento. En resumen, la ecuación de temperatura durante el ciclo de enfriamiento es:

$$T(x, t) = T(x)u(t) \approx T_{MAX} \frac{L^2 - x^2}{L^2} e^{-\lambda_c t} \approx T_{MAX} \cos \frac{\pi x}{2L} e^{-\lambda_c t} \quad (41)$$

La ecuación para el cambio de longitud en función del tiempo es:

$$\Delta L(t) = \Delta L e^{-\lambda_c t} . \quad (42)$$

Donde ΔL está dada por la ecuación 24.

2.3. Condiciones de frontera para el cálculo de frecuencias naturales

Se desarrollarán las condiciones que permitan describir y determinar las frecuencias naturales y los modos propios de vibración del sistema. Para ello se estudiarán las condiciones de frontera para el caso de una viga en voladizo

como en la Figura 2.3., de longitud L y de sección y propiedades constantes, empotrada en el extremo $X = 0$, al igual que para el caso de barras [Ruiz 2010] y [Sumali 2013].

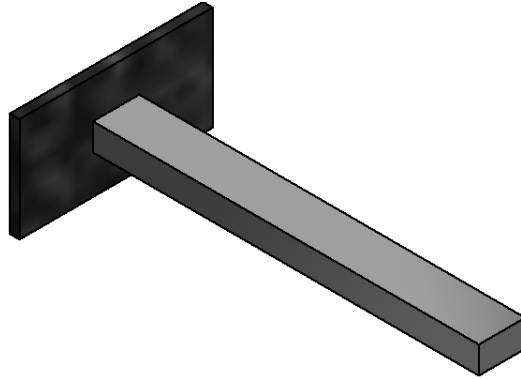


Figura 2-3 Viga en voladizo

Las condiciones de frontera para el extremo empotrado son ambas condiciones geométricas, ya que se definen por la imposibilidad de desplazamiento y giro en dicho extremo, están dadas por

$$v(0, t) = 0, \quad v'(0, t) = 0.$$

Mientras que en el extremo libre, las condiciones de contorno son de tipo natural, y equivalen al momento reflector y esfuerzos cortantes nulos.

$$v''(L, t) = 0, \quad v'''(L, t) = 0.$$

Teniendo en cuenta la expresión $v(x, t) = \phi(x)q(t)$, estas condiciones de frontera equivalen a

$$\begin{aligned} \phi(0) &= 0, & \phi'(0) &= 0, \\ \phi''(L) &= 0, & \phi'''(L) &= 0. \end{aligned}$$

Al sustituir estas condiciones en la ecuación 44, descrita en [Ruiz 2010]

$$\phi(x) = A_5 \sinh(\eta x) + A_6 \cosh(\eta x) + A_7 \sin(\eta x) + A_8 \cos(\eta x). \quad (43)$$

Permiten obtener la ecuación característica

$$\cos(\eta L) \cosh(\eta L) = -1. \quad (44)$$

A partir de la cual, se obtienen los valores de η y con ello los de las frecuencias naturales de vibración ω .

Las raíces de 44 pueden ser determinadas numéricamente, siendo las primeras seis:

$$\begin{aligned} \eta_1 L &= 1.875, & \eta_2 L &= 4.694, & \eta_3 L &= 7.855, \\ \eta_4 L &= 10.996, & \eta_5 L &= 14.137, & \eta_6 L &= 17.279. \end{aligned}$$

Es importante observar que se pueden calcular valores aproximados de estas raíces mediante la ecuación,

$$\eta_j L \cong \left(j - \frac{1}{2}\right) \pi. \quad (45)$$

De esta forma, las frecuencias naturales del sistema, que en este ejemplo es una viga en voladizo, son:

$$\omega_j = \eta_j^2 c = \eta_j^2 \sqrt{\frac{EI_z}{\rho A}}. \quad (46)$$

Siendo las seis primeras frecuencias naturales:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 3.51563 \sqrt{\frac{EI_z}{mL^3}}, & \omega_2 &= 22.03364 \sqrt{\frac{EI_z}{mL^3}}, & \omega_3 &= 61.7010 \sqrt{\frac{EI_z}{mL^3}}, & (47) \\ \omega_4 &= 120.9120 \sqrt{\frac{EI_z}{mL^3}}, & \omega_5 &= 199.8548 \sqrt{\frac{EI_z}{mL^3}}, & \omega_6 &= 298.5638 \sqrt{\frac{EI_z}{mL^3}}. \end{aligned}$$

Donde m es la masa total de la viga e $I_z = I = \frac{w^3 t}{12}$ es el momento de inercia (w = ancho de la barra y t = espesor o grosor de la barra).

2.4. Método por Elemento Finito (FEM)

El método por Análisis de Elemento Finito (FEA), originalmente introducido por (Turner, Clough, Martin, & Topp, 1956), es una técnica computacionalmente poderosa para aproximar soluciones a una variedad de problemas de ingeniería en el mundo real sujetos a condiciones de frontera generales. FEA o FEM llega a ser un paso esencial en el diseño o modelado de un fenómeno físico en varias disciplinas de la ingeniería. Un fenómeno físico usualmente

ocurre en una materia continua (sólido, líquido o gas) que involucran algunos campos variables.

El Método por Análisis de Elemento Finito requiere los siguientes pasos:

- Discretización del dominio en número finitos de subdominios (elementos).
- Selección de funciones de interpolación.
- Desarrollo de la matriz elemental de los subdominios.
- Ensamble de la matriz de elementos por cada subdominio para obtener a la matriz global.
- Asignación de las condiciones de frontera.
- Solución de las ecuaciones.
- Cálculos adicionales.

2.4.1. Barras y resortes

Se considera un elemento barra o resorte con dos nodos, dos grados de libertad, correspondiente a dos desplazamientos axiales $d_1^{(f)}$, $d_2^{(f)}$, como se muestra en la Figura 2.4. Se asume un elemento de longitud L , sección transversal constante de área A y módulo de elasticidad E . El elemento soporta solamente fuerzas axiales.

De tal manera que la deformación en la barra se obtiene como

$$\epsilon = \frac{d_2 - d_1}{L^{(f)}} \quad (48)$$

Mientras que el esfuerzo en la barra está dado por la Ley de Hooke como

$$\sigma = E^{(f)} \epsilon = E^{(f)} \frac{d_2 - d_1}{L^{(f)}} \quad (49)$$

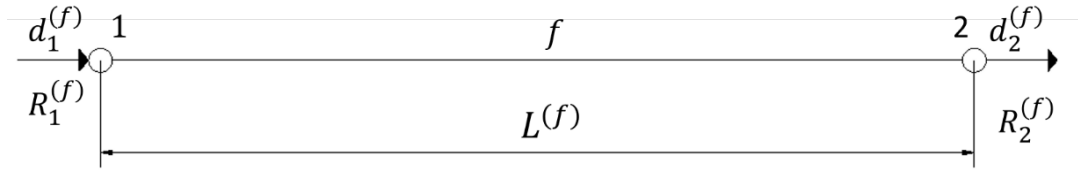


Figura 2-4 Elemento finito de una barra o resorte con dos nodos

La fuerza axial resultante se obtiene mediante la integración de esfuerzos a través de la dirección del espesor como (Ferreira, 2009):

$$N = A^{(f)}\sigma = (EA)^{(f)} \frac{d_2 - d_1}{L^{(f)}} \quad (50)$$

Tomando en cuenta el equilibrio estático de las fuerzas axiales $R_1^{(f)}$ y $R_2^{(f)}$, como

$$R_2^{(f)} = -R_1^{(f)} = N = \left(\frac{EA}{L}\right)^{(f)} (d_2^{(f)} - d_1^{(f)}) \quad (51)$$

Reescribiendo las ecuaciones tenemos

$$\mathbf{V}_n^{(f)} = \begin{Bmatrix} R_1^{(f)} \\ R_2^{(f)} \end{Bmatrix} = k^{(f)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1^{(f)} \\ d_2^{(f)} \end{Bmatrix} = \mathbf{K}^{(f)} \mathbf{a}^{(f)} \quad (52)$$

Donde $\mathbf{K}^{(f)}$ es la matriz de rigidez del elemento resorte o barra, $\mathbf{a}^{(f)}$ es el vector desplazamiento y $\mathbf{V}_n^{(f)}$ representa el vector de fuerzas nodales. Si el elemento sufre la acción de fuerzas distribuidas, es necesario transformar a esas fuerzas en fuerzas nodales, mediante

$$\mathbf{V}_n^{(f)} = k^{(f)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1^{(f)} \\ d_2^{(f)} \end{Bmatrix} - \frac{bl^{(f)}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \mathbf{K}^{(f)} \mathbf{a}^{(f)} - \mathbf{f}^{(f)} \quad (53)$$

Con $\mathbf{f}^{(f)}$ siendo el vector equivalente de fuerzas nodales para fuerzas distribuidas b .

2.4.2. Equilibrio en nodos

En la ecuación 54 se muestra la relación del equilibrio para un elemento, pero también se necesita obtener las ecuaciones de equilibrio para la estructura.

Por lo tanto, necesitamos ensamblar la contribución de todos los elementos que nos darán el sistema de ecuación global. De esta manera obtenemos:

$$\sum_{f=1}^{n_f} R^{(f)} = R_j^{(f)} \quad (54)$$

Donde n_f representa el número de elementos en la estructura, produciendo un sistema de ecuaciones globales en la forma

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (55)$$

O escrito en una forma compacta

$$\mathbf{Ka} = \mathbf{f} \text{ ó } \mathbf{Kd} = \mathbf{f} \quad (56)$$

Aquí \mathbf{K} representa al sistema de matriz de rigidez, \mathbf{a} , \mathbf{d} es el sistema de vector desplazamiento y \mathbf{f} representa el sistema de vector fuerza.

2.1. Análisis electromecánico del microactuador chevrón

Las ecuaciones involucradas en el comportamiento del dispositivo microactuador Chevrón Figura 2.5, son las que a continuación se describen:

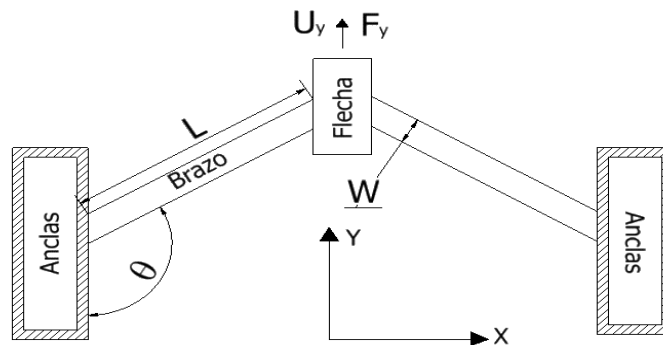


Figura 2-5 Microactuador Chevrón

El dispositivo de la Figura 2.5, es excitado en las anclas por un potencial eléctrico o una fuente de alimentación térmica. Esta excitación por el coeficiente de expansión térmica del material y al efecto Joule genera una

deformación o desplazamiento y una fuerza direccional sobre el eje “y” (U_y y F_y respectivamente).

Para encontrar las ecuaciones fundamentales de operación del dispositivo hacemos uso del siguiente diagrama de cuerpo libre de la Figura 2.6, que representa la mitad del microactuador Chevrón de la Figura 2.5.

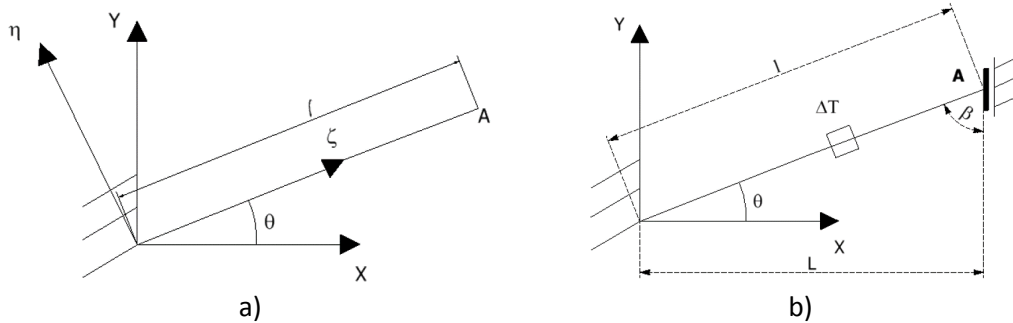


Figura 2-6 a) Diagrama de cuerpo libre para el análisis matemático por FEM y b) diagrama de cuerpo libre con un gradiente de temperatura

Para encontrar el desplazamiento en el nodo A en la dirección “y” y la fuerza axial en la barra, es importante realizar el ensamble de la matriz de rigidez elástica de la barra que corresponde a los desplazamientos del nodo A.

Con la finalidad de calcular la matriz global, primero debemos encontrar la matriz de rigidez elástica local de la Figura 2.6a. El sistema de ecuaciones que gobierna el comportamiento estructural de la barra cuando está sujeta a un incremento en el gradiente de temperatura ΔT , es:

$$\begin{bmatrix} \frac{EA_A}{l} & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\zeta^A \\ U_\eta^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \Delta T E A_A \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_\zeta^A \\ R_\eta^A \end{bmatrix} \quad (57)$$

Donde A_A es el área de la sección transversal, l es la longitud de la barra, E es el módulo de Young, I es el momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje ζ en el marco de referencia local, U_ζ^A y U_η^A son los desplazamientos del nodo A en las direcciones ζ y η respectivamente, α es el coeficiente de expansión térmica del material de la barra, R_ζ^A y R_η^A son las

fuerzas de reacción en el nodo A en las direcciones ζ y η , respectivamente, además de representar las direcciones ortogonales en el sistema de coordenadas locales, como se muestra en la Figura 2.6b.

De tal manera que para aplicar las condiciones de frontera en el marco de referencia global “x-y”, el sistema en la Figura 2.6b, se transforma a una matriz de rotación que relaciona los grados de libertad locales del sistema global,

$$\begin{bmatrix} U_{\zeta}^A \\ U_{\eta}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x^A \\ U_y^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x^A \\ U_y^A \end{bmatrix} \quad (58)$$

Donde U_x^A y U_y^A son los desplazamientos del nodo A en las direcciones “x” y “y” respectivamente.

Aplicando ec. 57 en ec. 58

$$\begin{bmatrix} (c^2 \frac{EA_A}{l} + s^2 \frac{12EI}{l^3}) & cs(\frac{EA_A}{l} - \frac{12EI}{l^3}) \\ cs(\frac{EA_A}{l} - \frac{12EI}{l^3}) & (s^2 \frac{EA_A}{l} + c^2 \frac{12EI}{l^3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x^A \\ U_y^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \Delta T E A_A c \\ \alpha \Delta T E A_A s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x^A \\ R_y^A \end{bmatrix} \quad (59)$$

Las condiciones de frontera, representan las restricciones en el nodo A, y estas son:

$$U_x^A = 0, \quad R_x^A \neq 0, \quad U_y^A \neq 0, \quad R_y^A = 0. \quad (60)$$

Donde R_x^A y R_y^A son fuerzas de reacción del nodo A en las direcciones “x” y “y”, respectivamente.

Sustituyendo los campos de las condiciones de frontera en el sistema de ecuación 59,

$$\begin{bmatrix} (c^2 \frac{EA_A}{l} + s^2 \frac{12EI}{l^3}) & cs(\frac{EA_A}{l} - \frac{12EI}{l^3}) \\ cs(\frac{EA_A}{l} - \frac{12EI}{l^3}) & (s^2 \frac{EA_A}{l} + c^2 \frac{12EI}{l^3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U_y^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \Delta T E A_A c \\ \alpha \Delta T E A_A s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x^A \\ 0 \end{bmatrix} \quad (61)$$

La ecuación 61 proporciona el desplazamiento en el nodo A en la dirección “y” debido al incremento del gradiente de temperatura ΔT a lo largo de la barra. La ecuación nos proporciona las fuerzas de reacción en la dirección x,



$$U^{\Delta T} \equiv U_y^A = \alpha \Delta T l \frac{s}{(s^2 + c^2 \frac{12I}{Al^2})} \equiv \alpha \Delta T l \frac{s}{s^2 + \frac{c^2}{\psi}} = \frac{Fl}{EA} \frac{1}{2(s^2 + \frac{c^2}{\psi})} \quad (62)$$

$$R_x^{\Delta T} \equiv R_x^A = -\alpha \Delta T EA \frac{c}{s^2 \frac{Al^2}{12I} + c^2} \equiv -\alpha \Delta T EA \frac{c}{s^2 \psi + c^2} \quad (63)$$

De R_x^A , es posible obtener la fuerza axial interna N en la barra a lo largo de la dirección axial, llamada, $N = R_x^A c$. El parámetro adimensional $\psi = Al^2/12I$ está definido como la razón de la rigidez axial o de flexión.

Al concluir este capítulo, observamos que los ejemplos de análisis presentados, pueden utilizarse con las adaptaciones correspondientes, con relación a las geometrías y condiciones de frontera, a las que se sometan los dispositivos del siguiente capítulo.

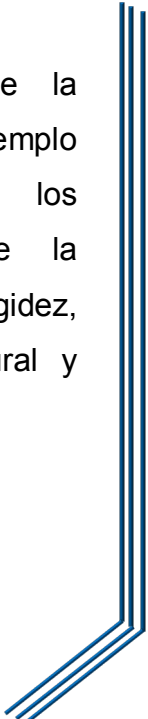
Cabe señalar que debido a la complejidad involucrada, de manera teórica en la bibliografía no se ha hallado un análisis completo de algún microsistema, tal como una micropinza. Es decir, se presentan análisis teóricos de casos individualizados. Sin embargo, mediante la simulación es posible hacer una caracterización completa.



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA APLICADA A DOS DISPOSITIVOS REPRESENTATIVOS

En este capítulo se describe la metodología a utilizar, con un ejemplo sencillo, para caracterizar a los parámetros de operación de la micropinza, tales como: fuerza, rigidez, desplazamiento, frecuencia natural y formas modales.



3. METODOLOGÍA

3.1. Metodología

La metodología a seguir en el diseño de los dispositivos en los que se enfoca esta tesis, se muestra en la Figura 3.1.

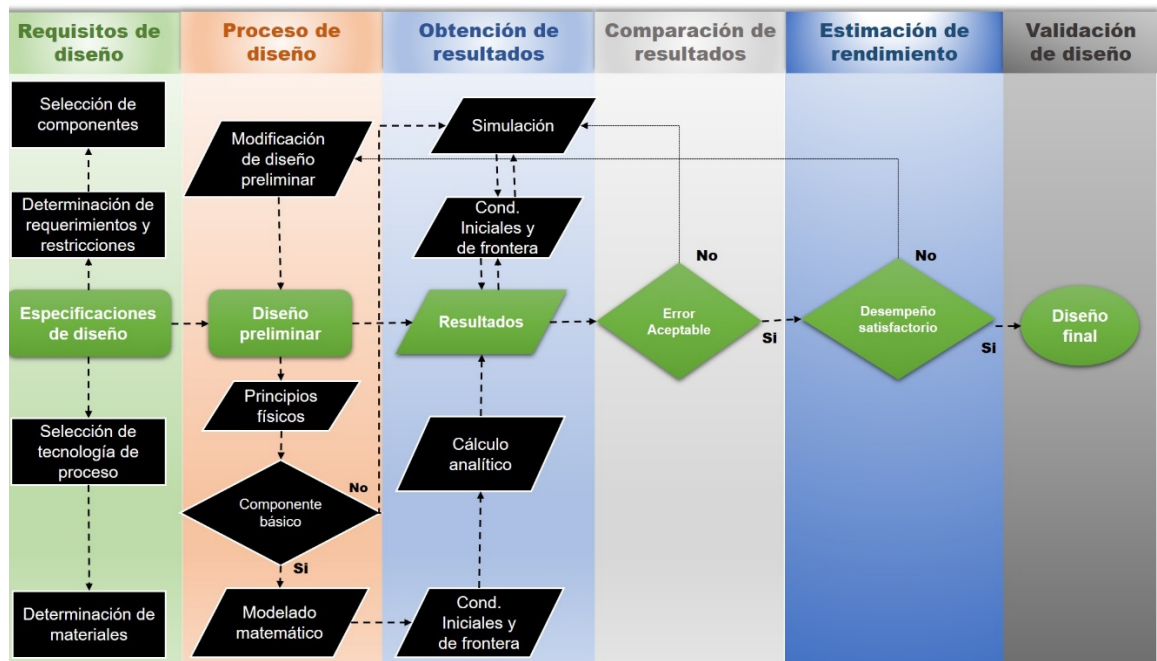


Figura 3-1 Metodología.

Como puede observarse en la Figura 3.1, para el caso de componentes o elementos básicos, se validan los resultados teóricos, comparando con los obtenidos mediante la simulación.

Si se trata de un sistema complejo, se procede al análisis de los principios físicos que determinan su comportamiento, a partir del cual se determinan las condiciones de operación y se procede a su simulación.

En el caso de componentes o elementos básicos, se realiza la comparación de resultados obtenidos mediante el modelo teórico y la simulación. En el caso de estructuras complejas, se continúa con el análisis de desempeño, puesto

que no puede llevarse a cabo la comparación, al tener solamente los resultados de la simulación.

Si los parámetros de desempeño de la estructura bajo análisis tienen valores aceptables, de acuerdo a los requeridos por la aplicación a la que es diseñada, o bien, de acuerdo a la bibliografía, se concluye el proceso.

3.2. Ansys

Ansys Multiphysics, es una herramienta que permite obtener y observar el comportamiento de los parámetros de operación de algunos microsistemas, el alcance de este software esta descrito de forma esquemática en la Figura 3.2. No tiene un alcance integral que nos ayude a observar preliminarmente la fabricación, pero si permite proporcionar resultados cercanos al comportamiento real, siempre y cuando las condiciones de fronteras sean correctamente definidas.

Esta herramienta será utilizada en el bloque de simulación, mencionado en la Figura 3.1.

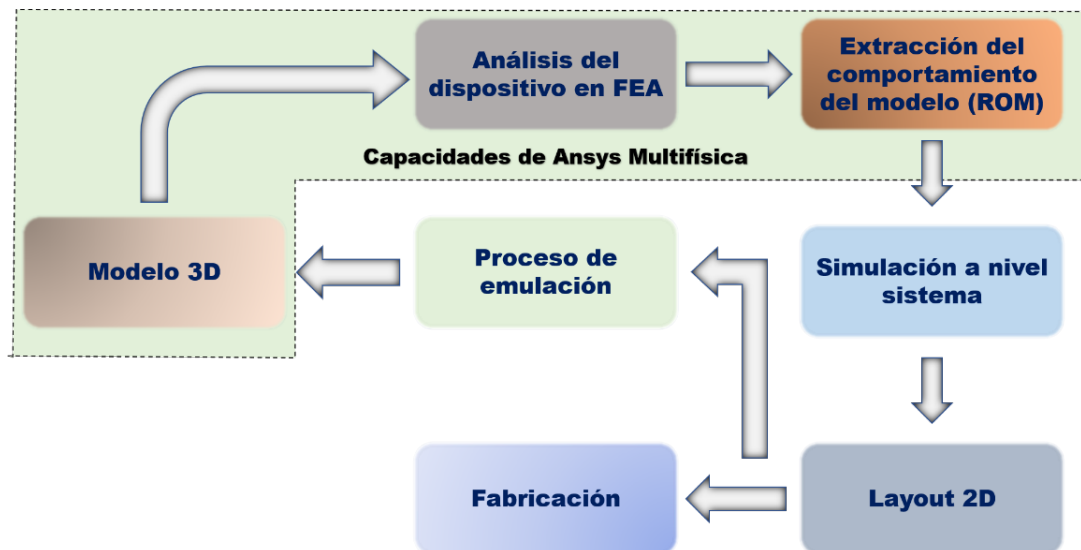


Figura 3-2 Integración de Ansys Multifísica en el proceso de diseño de los Microsistemas/MEMS. En este trabajo, solo se aborda la parte sombreada, a la que se denomina Capacidades de Ansys multifísica. Adaptación realizada a partir de Fuente: Theory reference (Ansys, 2006).

Dentro de las capacidades de aplicación que se pueden desarrollar en Ansys Multiphysic, se encuentran los siguientes:

Tabla 3-1 Tabla de las capacidades de análisis de Ansys para un rango de aplicaciones específicas según los MEMS .

| Aplicación de los microsistemas | Capacidades de Ansys Multifísica | Aplicación de los microsistemas | Capacidades de Ansys Multifísica |
|--|--|---|--|
| Dispositivos inerciales: acelerómetros y giroscopios | Modal estructural, estático, transitorio, electrostático-estructural, macromodelado de orden reducido a nivel de sistema | Dispositivos electrostáticos tipo peine | Acoplamiento electrostático-estructural. Extracción de capacitancia |
| Dispositivos de onda acústica superficial | Acoplamiento acústico - estructural | Canales microfluídicos | Flujo continuo No-Newtoniano/Newtoniano |
| Microtiras | Alta frecuencia electromagnética | Actuadores piezoeléctricos | Parámetros ortotrópicos e isotrópicos |
| Antenas microparche y fractales | | | |
| Piezo cabezales de impresión de tinta | Actuación térmica: acoplamiento físico termo-electro-estructural | Transductores de presión | Basado en capacitancia: acoplamiento estructural electrostático. Piezoresistivo acoplamiento indirecto electro-estructural |
| Termo cabezales de impresión de tinta | Actuación piezoeléctrica: acoplamiento físico eléctrico-estructural. Superficies libres y acción capilar | Filtros RF electromecánicos | Acoplamiento estructural electrostático. Extracción de capacitancia |
| Espectrómetros de micromasas | Electromagnética y rastreo de partículas cargadas | Micropinzas | Estructural-electro-térmico |
| Tecnología microespejos | Acoplamiento estructural electrostático. Capacidad estructural fluidica para evaluar efectos de amortiguamiento | Ensamble de microengranes | Mecánica contacto complejo y fricción |
| Actuadores termoeléctricos | Acoplamiento estructural-electro-térmico | Actuadores magnetostrictivos | Electromagnética de baja frecuencia |

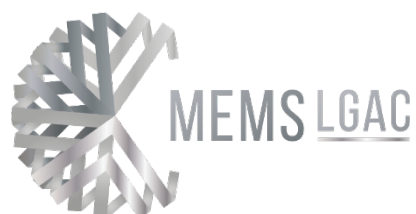
La metodología propuesta es flexible, de acuerdo al nivel de complejidad de la estructura a analizar. Ya que, realizar el modelado de estructuras complejas, tiene a su vez, un alto nivel de complejidad.



CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL CANTILÉVER (TRAMPOLÍN)

En este capítulo se diseña al cantiléver a utilizar como elemento básico del microactuador Chevrón y posteriormente de la micropinza.



4. Diseño del cantiléver

En este capítulo se presenta el procedimiento de diseño de un cantiléver que será utilizado en el diseño de la micropinza. Para lo cual, se sigue la metodología planteada en el capítulo 3.

4.1. Especificaciones de diseño

El cantiléver es generalmente usado como interruptor, o como un sensor (Jithendra Prasad & Shameem, 2016). Además, cuando se hacen arreglos de cantiléver, junto con otros elementos, se generan actuadores Chevrón.

Consideramos en este trabajo necesario el diseño y caracterización de un cantiléver para su uso en el Chevrón que servirá de base a la micropinza a diseñar. Además. El Chevrón será diseñado con dimensiones semejantes a (Varona, Tecpoyotl-Torres, & Hamoui, 2007). Por lo que tendremos una aproximación.

La representación física de un cantiléver no es más que una viga anclada en cualquiera de sus extremos. Hay por ejemplo, vigas rectangulares, triangulares, trapezoidales, en forma de V, en forma de T, etc., las cuales se fijan en un extremo (cara). Los parámetros de diseño de cantiléver se basan en tres fórmulas (i) Fórmula de Stone (ii) Fórmula de la constante del resorte, y la (iii) Ley de Hooke, todas ellas mencionadas en el capítulo anterior.

En este ejemplo se utiliza una viga rectangular.

4.1.1. Selección de tecnología

Este dispositivo puede ser implementado en la tecnología PolyMEMS-INAOE, la cual se describe en el anexo A. Bajo los ajustes respectivos, puede ser implementado en otra tecnología de fabricación, de acuerdo a las reglas de diseño.

4.1.2. Determinación de materiales

Se eligen 3 materiales semiconductores para implementar al cantiléver, siendo los más conocidos y utilizados en la literatura como elemento estructural.

En la Tabla 4.1, se describen los parámetros de los 3 materiales semiconductores para desarrollar las simulaciones en el programa por Elemento Finito, Ansys Workbench. La asignación del material se determina

en la caja de herramientas llamada Engineering Data del espacio de trabajo (*Workspace*) de Workbench.

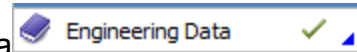


Tabla 4-1 Tabla de los parámetros eléctricos y mecánicos de los materiales utilizados en la simulación por Elemento Finito.

| Parámetros | Polisilicio (Caballero & Yen) | Silicio (Yang & Qingsong, 2017) | Nitruro de Si (Jithendra Prasad & Shameem, 2016) |
|---|----------------------------------|------------------------------------|---|
| Densidad, ρ [kg/m ³] | 2320 | 2329 | 3310 |
| Módulo de Young, E [GPa] | 160 | 130.1 | 317 |
| Coefficiente de expansión térmica, α [1/K] | 2.6 e-6 | 2.568 e-6 | 3.4e-6 |
| Conductividad térmica, κ [W/ m ² K] | 34 | 148 | 27 |
| Razón de Poisson, ν | 0.22 | 0.33 | 0.23 |
| Calor específico, Cp [J/ kg*K] | 788.3 | 712 | 691 |
| Resistividad, ρ [Ω *m] | 2.2e-5 | 1.5 e-4 | 1e12 |
| Punto de fusión, [°C] | 1411.85 | 1450 | 1500 |
| Tensile Yield strength [MPa] | 1.2 | 250 | 360-434 |

4.1.3. Selección de componentes

Este dispositivo es básico, no tiene más componentes que la viga anclada en uno de sus extremos.

4.1.4. Determinación de requerimientos y restricciones

Para esta prueba se utilizará como material estructural al Silicio. Cuando se tenga al dispositivo funcional, se realizarán pruebas con los otros materiales semiconductores propuestos.

La estructura inicialmente está a temperatura ambiente (22 °C), posteriormente el ancla o pad, será alimentado por una fuente de alimentación eléctrica de 5V.

4.2. Diseño preliminar del Cantiléver

Al dispositivo micro cantiléver, mostrado en la Figura 4.1, será el modelo de referencia para llevar a cabo la simulación del dispositivo.

La pared de restricción estará a una distancia de $2\ \mu\text{m}$ con respecto al extremo libre del dispositivo. Las dimensiones del dispositivo son, longitud $L = 200\ \mu\text{m}$, ancho $w = 3\ \mu\text{m}$ y espesor $t = 2\ \mu\text{m}$. A este cantiléver le aplicaremos las ecuaciones 13, 14 y 17, correspondientes al cálculo del desplazamiento o deformación, la Ley de Hooke y el cálculo de esfuerzo.

Este diseño fue tomado de acuerdo con los elementos del actuador Chevron presentado por (Varona, Tecpoyotl-Torres, & Hamoui, 2007), el cual además servirá de elemento base para la micropinza.

Con relación a las dimensiones utilizadas por otros autores, cabe señalar que, para aplicaciones en general, utilizando SiO_2 como material estructural, se utilizan por ejemplo, longitud $L = 60\ \mu\text{m}$, ancho $w = 10\ \mu\text{m}$ y grosor $t = 1.5\ \mu\text{m}$ (Suryansh, Sumati, Arti, & P.J., 2012). Mientras que para biosensores, tienen longitudes de $500\ \mu\text{m}$ con ancho de $100\ \mu\text{m}$, con grosores o espesores de $2\ \mu\text{m}$ (Jithendra Prasad & Shameem, 2016), e incluso con ancho y grosor fijo de $100\ \mu\text{m}$ and $1\ \mu\text{m}$, respectivamente, varían la longitud de $100\ \mu\text{m}$ a $1100\ \mu\text{m}$.

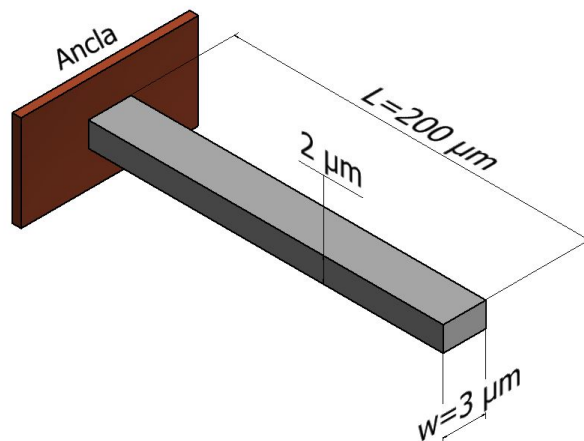


Figura 4-1 Diseño preliminar del cantiléver.

4.3. Resultados

4.3.1. Resultados de simulación

Para calcular el Esfuerzo provocado por la pared en el micro cantiléver se utilizarán las siguientes librerías (*Toolbox*) en el *Project Schematic* del Workbench; *Steady state termal* → *Static Structural* (Figura 4.2).

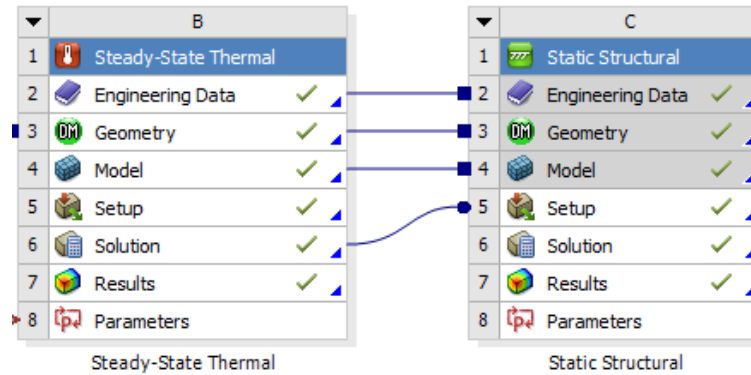
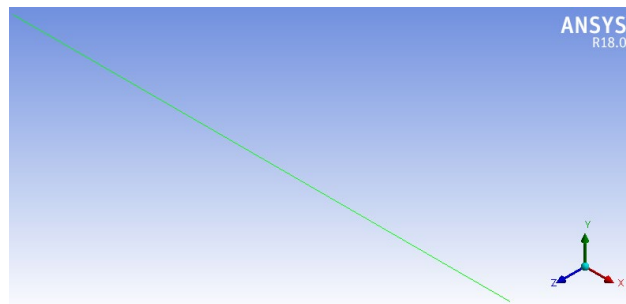
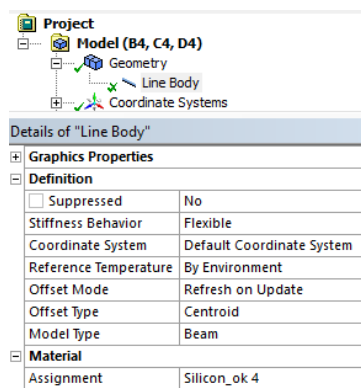


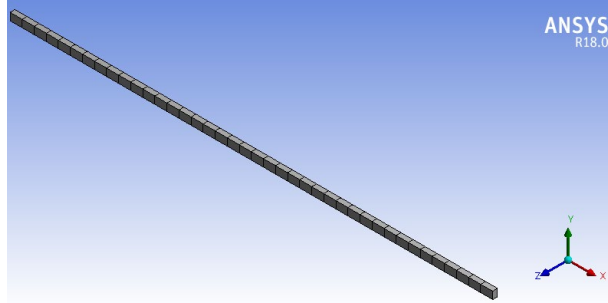
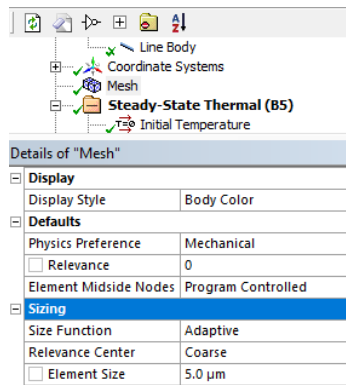
Figura 4-2 Árbol principal de simulación en el espacio de trabajo de Workbench

Para una mejor comprensión en el proceso de simulación, a continuación se describirán los pasos fundamentales de la simulación y de la asignación de las condiciones de frontera en el dispositivo microcantiléver:

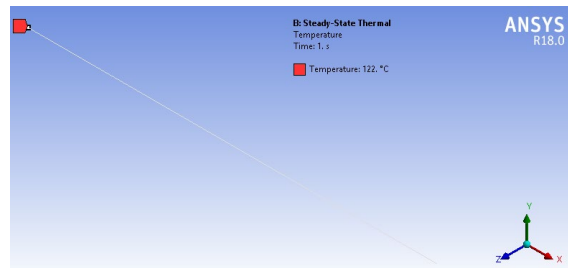
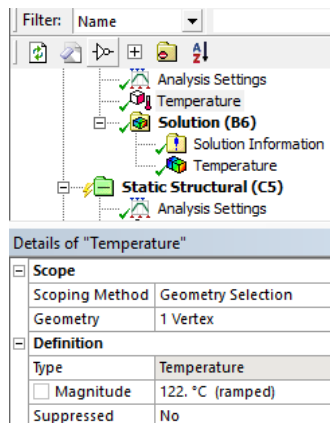
1er. Paso: Asignación del material Si al dispositivo.



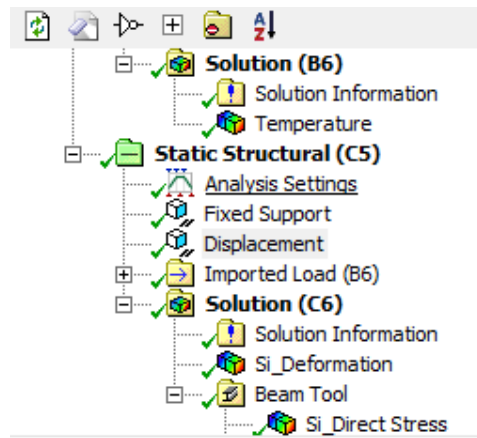
2do. Paso: Se aplica el mallado o mesh, con dimensiones de 5 μm cada elemento de malla. De tal manera que se generan 40 elementos o subdominios a lo largo del microcantiléver.



3er. Paso: Asignación de la fuente de alimentación térmica en uno de los extremos del dispositivo ΔT ($122^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$) = 100°C , en el *Steady State Thermal*.

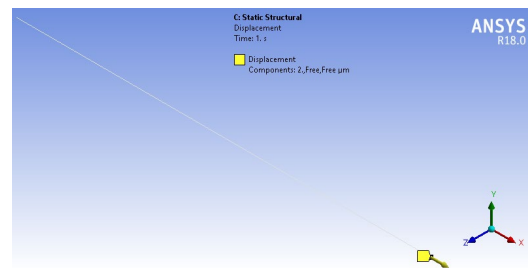
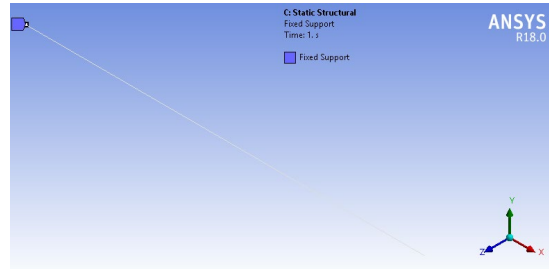


4to. Paso: En el *Static Structural*, con la opción *Fixed Support* fijamos al microactuador en uno de los extremos y con la opción *Displacement* asignamos la restricción de la pared a un distancia de 2 μm sobre el eje X, como se observa en la imagen.



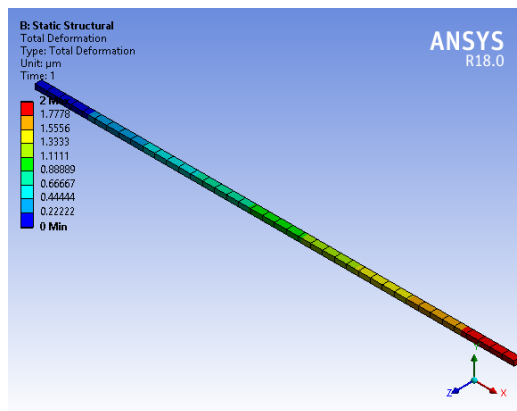
Details of "Displacement"

| Scope | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Vertex |
| Definition | |
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| <input type="checkbox"/> X Component | 2. μm (ramped) |

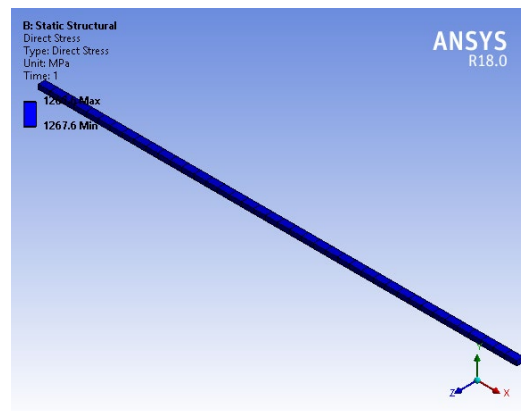


5to. Paso: Visualización de los resultados.

El resultado de la deformación o desplazamiento es la que se observa en la Figura 4.3a y el esfuerzo debido a la pared a una distancia de 2 μm respecto a uno de los extremos libres del dispositivo se muestra en la Figura 4.3b.



a)



b)

Figura 4-3 a) Deformación del cantiláver con una restricción en desplazamiento de 2 μm b) esfuerzo ejercido en el microcantilever por la restricción de 2 μm

4.4. Comparación

4.4.1. Esfuerzo y deformación

Con los resultados de la sub-sección previa usando Silicio, nos permite aplicar las ecuaciones de la sección 2, para realizar las comparaciones de los datos obtenidos de la simulación, Tabla 4.2.

Tabla 4-2 Tabla comparativa de los resultados del esfuerzo, simulado y calculado

| Esfuerzo [MPa], simulación | Esfuerzo [MPa], calculado | % Error |
|----------------------------|---------------------------|---------|
| 1274.94043 | 1274.9405 | 1.5e-6 |

Con la finalidad de validar los resultados de las ecuaciones y la técnica de simulación al asignar las condiciones de frontera del microcantilever, se realizó un análisis profundo parametrizando la temperatura de 40 °C a 150 °C, para evaluar la confiabilidad de los valores calculados.

En la Figura 4.4 se observa la parametrización de la temperatura vs el esfuerzo, con una media estadística en el porcentaje de error de 2.1 % el barrido consistió de 25 valores de temperatura en incrementos de 5 °C.

En la Figura 4.5, se presenta la deformación del microcantilever sin la restricción de la pared, en condición libre sobre el eje X.

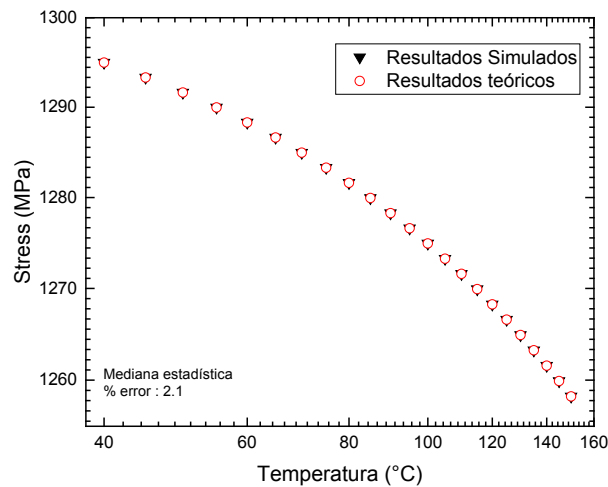


Figura 4-4 Gráfica de la evaluación en barrido de temperatura vs esfuerzo

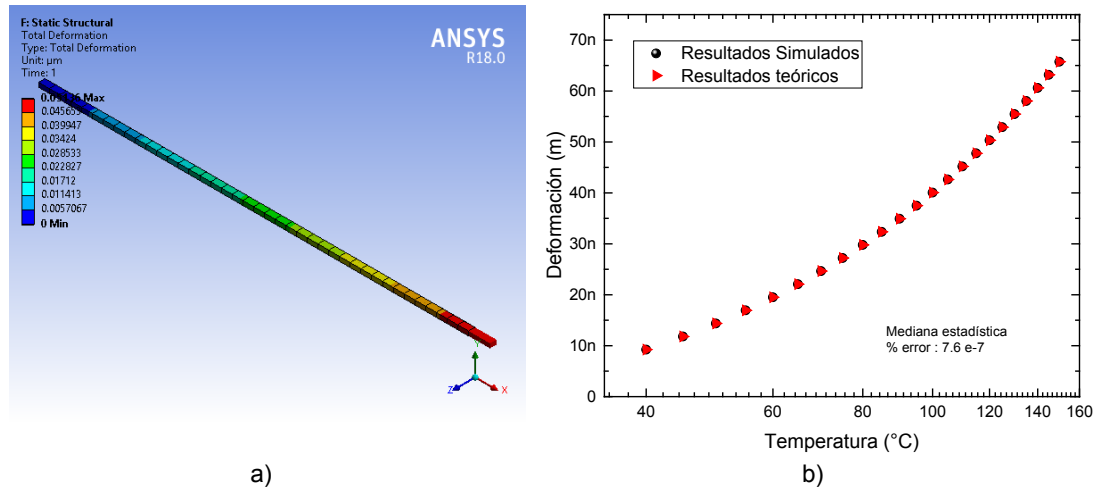


Figura 4-5 a) Representación visual de la deformación del dispositivo b) Gráfica de la evaluación en barrido de temperatura vs deformación sin restricción

La deformación máxima se presenta en el eje x y está representada en color rojo, ver Figura 4.5a. El barrido en gradiente de temperatura para evaluar la deformación o desplazamiento es el que se muestra en la Figura 4.5b, en donde se realiza la comparación de los valores calculados con los obtenidos en la simulación con un porcentaje de $\% \text{ error} = 7.6e - 7$.

4.4.2. Frecuencia natural y su forma modal

Para el cálculo de la frecuencia natural por Elemento Finito en Ansys Workbench, utilizamos el *toolbox* → *Modal*, en el espacio de trabajo del simulador.

El elemento es sometido a una vibración libre sin ninguna carga, con una restricción fija en uno de los extremos del microcantilever asignando un número finito de formas modales de vibración, 5. El flujo de trabajo es el mostrado en la Figura 4.6. El material estructural utilizado en la simulación para el dispositivo es Silicio y el tamaño de los dominios en la malla son de 5 μm.

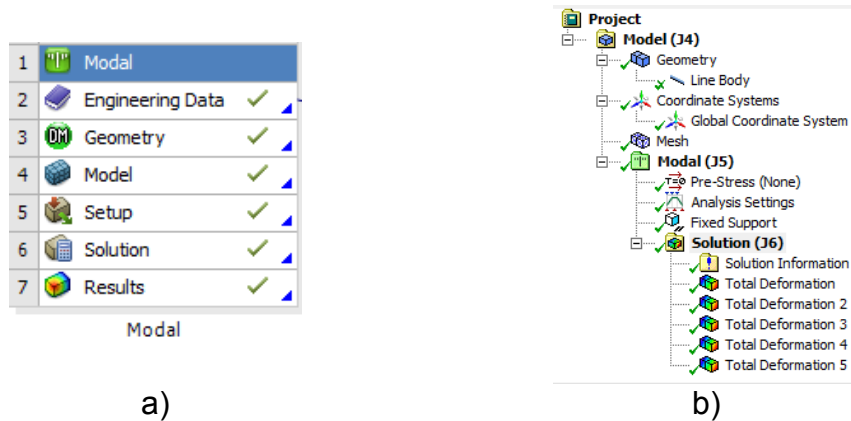


Figura 4-6 a) Toolbox para el cálculo Modal b) árbol de simulación, Preprocesamiento → Procesamiento → Postprocesamiento

De tal manera que de la ecuación 46 y 47, podemos encontrar la primera forma modal del dispositivo con su respectiva frecuencia natural, ω_1 .

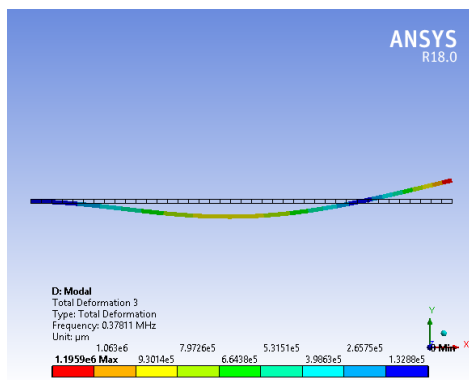
La siguiente fase en el proceso de caracterización del microcantilever es llevar a cabo cinco modificaciones en su longitud y en cada nuevo diseño calcular su frecuencia natural con su respectiva forma modal.

En la Figura 4.7, se presentan las imágenes de las simulaciones considerando cinco modificaciones en longitud del dispositivo y sus respectivas formas modales con las frecuencias naturales. Las cinco simulaciones fueron evaluadas con las mismas condiciones de frontera; una temperatura ambiente de 22 °C, una restricción fija en uno de los extremos del micro cantiléver y sin ninguna carga de operación o alimentación. Es importante mencionar para la reproducción de los resultados, que en el cálculo de la frecuencia natural de dicha forma modal, se considera la masa, ya que este parámetro es el que se estará cambiando conforme se modifique la longitud del dispositivo.

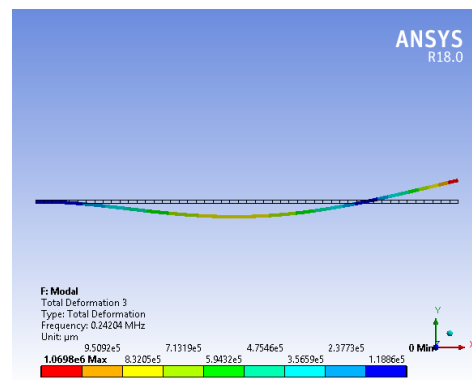
Con el objetivo de observar la exactitud de los resultados en la simulación con respecto a los calculados y validar las técnicas en la asignación de las condiciones de frontera, en la Tabla 4.3 están los resultados de los valores calculados con respecto a la simulación y los márgenes de error entre estos resultados.

Tabla 4-3 Frecuencias naturales de las formas modales del microcantilever a diferentes longitudes, usando Silicio

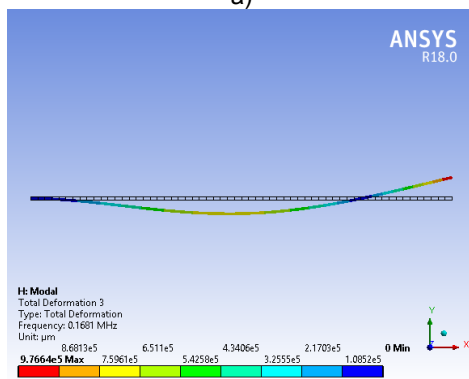
| Longitud, microcantilever (μm) | Frecuencia natural (Hz), simulación | Frecuencia natural (Hz), calculado | % Error |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---------|
| $L_1 = 200$ | 378110 | 379259.48 | 0.304 |
| $L_2 = 250$ | 242040 | 242726.07 | 0.283 |
| $L_3 = 300$ | 168100 | 168559.77 | 0.273 |
| $L_4 = 350$ | 123510 | 123839.83 | 0.267 |
| $L_5 = 400$ | 94566 | 94814.87 | 0.263 |



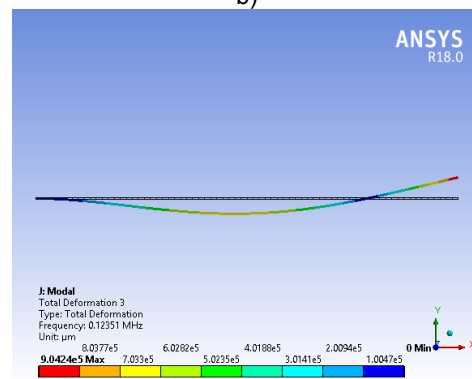
a)



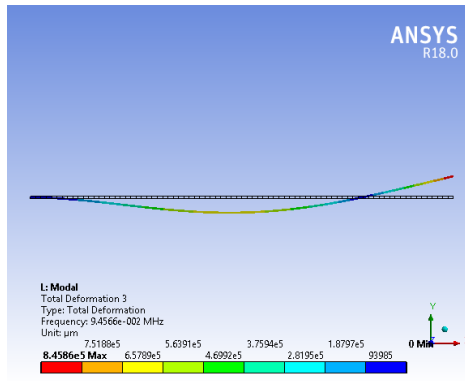
b)



c)



d)



e)

Figura 4-7 Formas modales de los dispositivos microcantilevers con longitudes en a) $L_1 = 200 \mu\text{m}$, b) $L_2 = 250 \mu\text{m}$, c) $L_3 = 300 \mu\text{m}$, d) $L_4 = 350 \mu\text{m}$ y e) $L_5 = 400 \mu\text{m}$

4.4.3. Parametrización de fuerza, deformación y esfuerzo

Considerando la ley de Hooke $F = -kx$, (Fuerza = constante de rigidez x desplazamiento). La rigidez es un parámetro que involucra propiedades del material, puede obtenerse de la siguiente manera $k = EA/L$ (Kaajakari, 2009), donde A es la sección transversal del dispositivo.

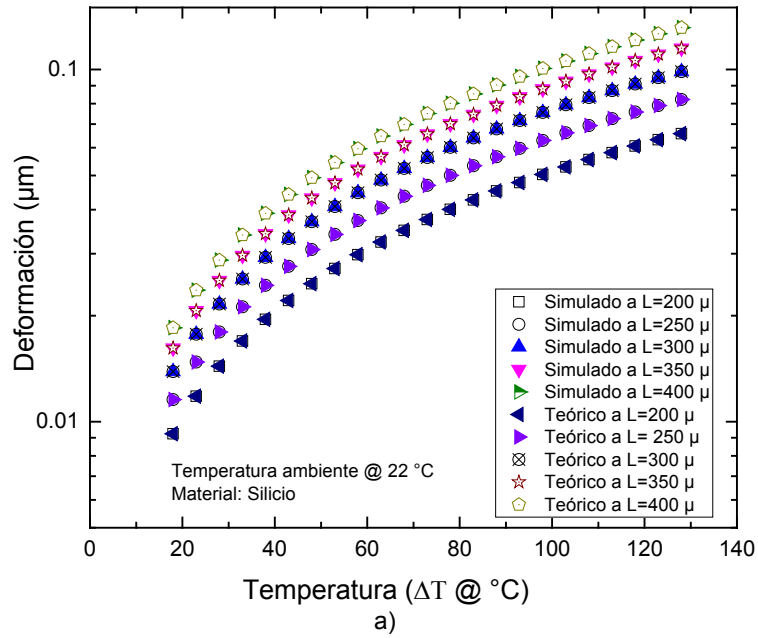
De tal manera que la rigidez o la constante de rigidez para las diferentes longitudes de los dispositivos microcantilevers es la que se muestra en la Tabla 4.4.

Para calcular la masa hacemos uso de la ecuación $m = V\rho$ (m ; masa, V ; volumen, ρ ; densidad) teniendo en consideración que el volumen lo calculamos como $V = L \times w \times t$ (Largo x ancho x espesor). Así mismos, la masa también se puede obtener directamente de Ansys Workbench, en la sección de reporte (*report preview*).

En la Figura 4.8, se describen las gráficas de los barridos por gradientes de temperatura con respecto a las diferentes longitudes del dispositivo. Se muestran las comparaciones de los valores obtenidos de manera teórica con los calculados en la simulación, fuerza y deformación principalmente.

Tabla 4-4 Valores de rigidez y masa calculados y simulados.

| Longitudes del microcantilever (μm) | Masa (kg) | Rigidez simulado (N/m) | Rigidez calculado (N/m) | % Error rigidez |
|--|-----------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| $L_1 = 200$ | 2.79E-12 | 3903.006 | 3903.00 | 1.5e-6 |
| $L_1 = 250$ | 3.49E-12 | 3122.399 | 3122.40 | -320e-9 |
| $L_1 = 300$ | 4.19E-12 | 2602.000 | 2601.90 | 38.4e-6 |
| $L_1 = 350$ | 4.89E-12 | 2230.280 | 2230.29 | -1e-9 |
| $L_1 = 400$ | 5.59E-12 | 1951.500 | 1951.00 | 256e-6 |



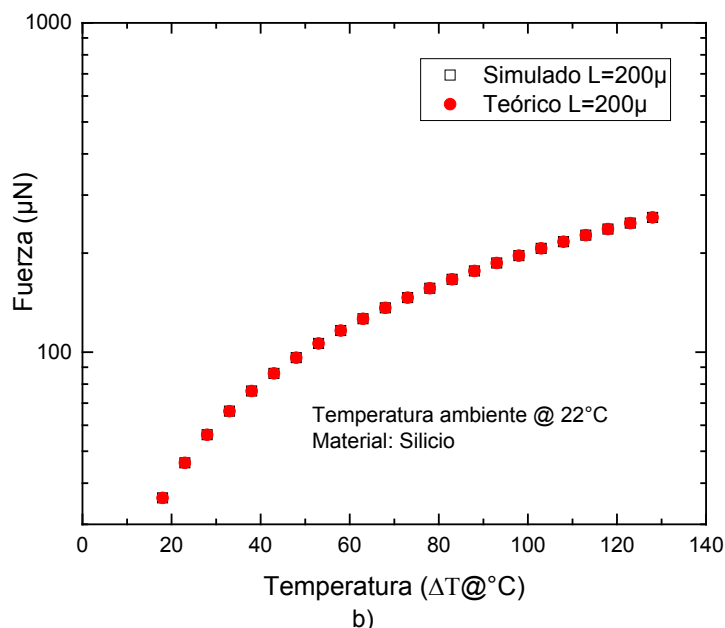


Figura 4-8 Gráfica de validación a) barrido en temperatura vs deformación con longitudes, 200 - 400µm y b) barrido en temperatura vs fuerza de desplazamiento.

En las simulaciones se tomó como material de referencia para todos los dispositivos al Silicio.

Con la finalidad de verificar el comportamiento del dispositivo con otros materiales y observar las desviaciones numéricas de los resultados calculados utilizando las ecuaciones 13, 14 y 17, las cuales corresponden a la deformación, la Ley de Hooke y el cálculo del esfuerzo se procedió a realizar un barrido de estos parámetros, ver figura 4.9.

Para las simulaciones, se implementaron tres materiales, Silicio (Si), Polisilicio y Nitruro de Silicio (Si_3N_4). Primero se evalúa el esfuerzo en los tres materiales con un barrido en gradiente de temperatura (ΔT) de 40 °C a 205 °C a una temperatura ambiente de 22 °C, la longitud del microcantilever es fijo para los tres materiales de 200 µm, así como las dimensiones transversales del dispositivo, ancho 2 µm y espesor 3 µm. Los barridos en temperatura que se proponen realizar van en dependencia a lo sugerido y a lo que se está haciendo en el estado del arte referente a estos microdispositivos.

En la Figura 4.9, se presenta el esfuerzo calculado teóricamente vs simulación, las desviaciones son mínimas y se pueden verificar en la Figura 4.9b con los márgenes de error.

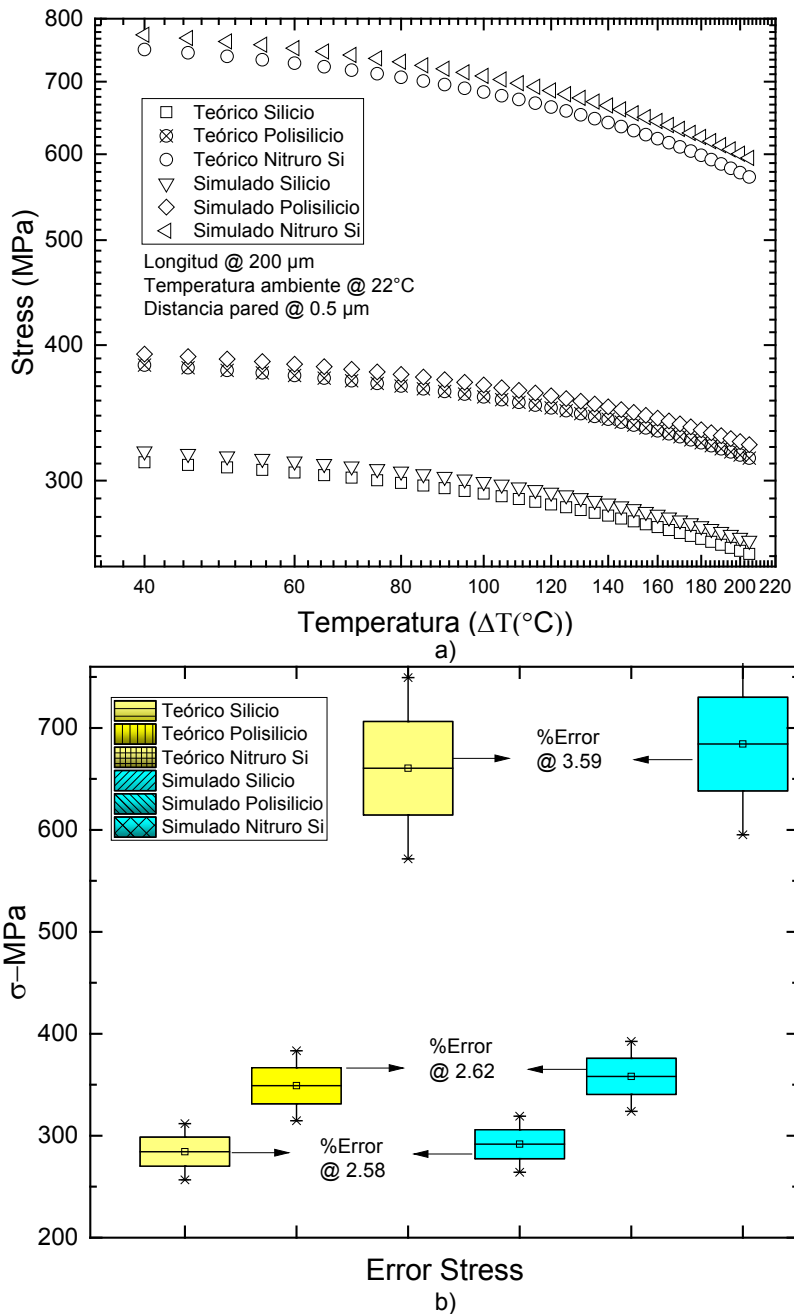


Figura 4-9 Gráfica a) barrido en temperatura vs esfuerzo y b) % de error entre los valores calculados y simulados

La parametrización mostrada en la Figura 4.10, corresponde al desplazamiento o deformación y los respectivos porcentajes de error. Se llevaron a cabo las simulaciones con Silicio, Polisilicio y Nitruro de Silicio.

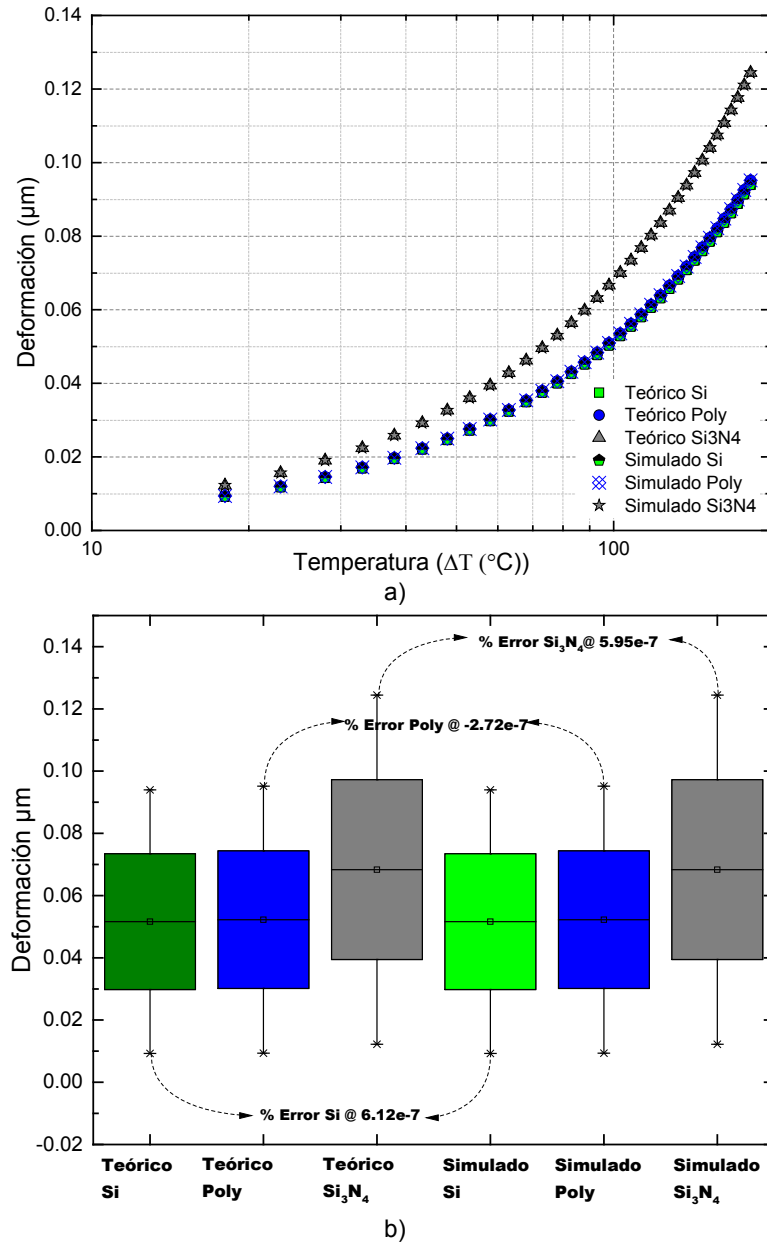


Figura 4-10 Gráfica a) barrido en gradiente de temperatura vs deformación y b) % de error entre los valores calculados y simulados de la deformación, en los materiales Si, Poly y Si₃N₄

A continuación, se presenta la rigidez del dispositivo cantiléver para los tres tipos de materiales. En los cálculos utilizamos la siguiente ecuación EA/l , ver Tabla 4.5.

Tabla 4-5 Valores de rigidez teórico y simulado con sus desviaciones correspondientes.

| Rigidez | Teórico N/m | Simulado N/m | % Error |
|--------------------|----------------|-----------------|----------|
| Silicio | 3903 | 3902.9 | 2.56e-3 |
| Polisilicio | 4800 | 4799.0 | 20.83e-3 |
| Nitruro de Silicio | 9510 | 9509.0 | 10.5e-3 |

De tal manera que con dichos valores de rigidez se puede calcular la fuerza con la que se desplaza el dispositivo microcantiléver para los tres materiales asignados, ver Figura 4.11.

Se termina de validar las ecuaciones y el comportamiento electromecánico del microcantilever aplicando la parametrización de los valores de operación del dispositivo, ver Figura 4.11a.

Los márgenes de error como se observa en la Figura 4.11 b, son muy pequeños.

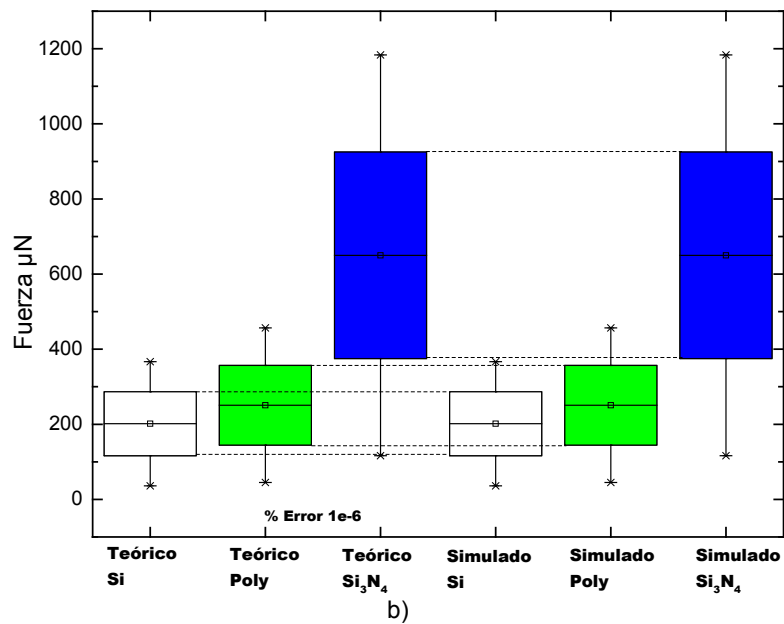
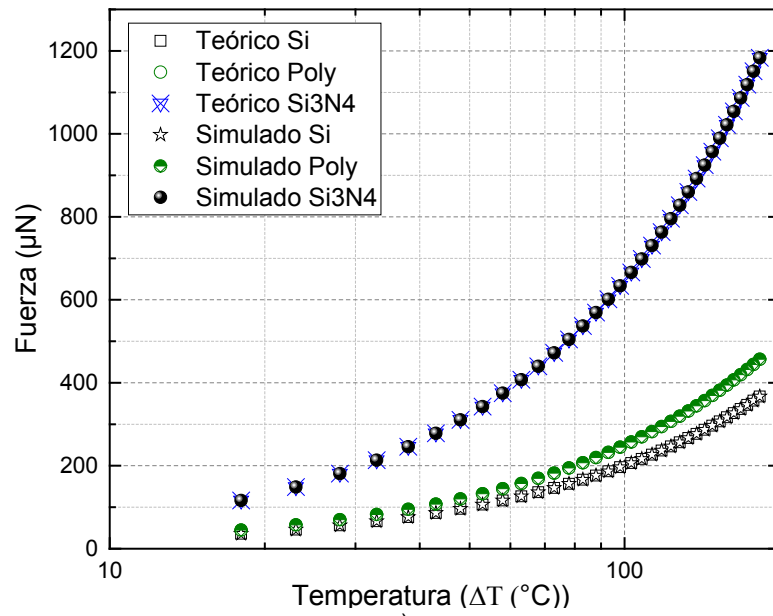


Figura 4-11 Gráfica a) barrido en gradiente de temperatura vs fuerza de actuación del microcantilever y b) % de error entre los valores calculados y simulados en fuerza.

4.5. Análisis de Parámetros de desempeño

El efecto de la longitud del cantiléver se observa especialmente en la frecuencia natural, de manera inversamente proporcional. A $200\ \mu\text{m}$, la frecuencia natural es de $378.1\ \text{kHz}$, el cual es el valor apropiado para el diseño

de la micropinza, además de ser una frecuencia natural que oscila entre los microdispositivos del estado del arte.

La temperatura tiene una fuerte influencia directa sobre la deformación del cantiléver, sin embargo, para los materiales utilizados, se observa que a partir de los 100 °C, el incremento disminuye, tendiendo hacia una respuesta constante, por lo que no es necesario el uso de altas temperaturas. Para Silicio, considerando una longitud de 200 μm se tiene una deformación de 0.06 μm . La fuerza tiene una tendencia similar, con respecto al incremento de temperatura, para la misma longitud de cantiléver, se tiene una fuerza de 300 μN .

Para la simulación del esfuerzo, se consideró la restricción de pared a 0.5 μm , con un barrido de temperatura de 40°C a 200°C, la respuesta es creciente, siendo el crecimiento mínimo para el caso del Silicio. Por lo que este material puede ser utilizado como estructural. La deformación aumenta con la temperatura, siendo ligeramente mayor para Si_3N_4 . La fuerza también es mayor con este material al incrementarse la temperatura, alcanzando un máximo de 1200 μN a 110°C, que es el mayor valor de temperatura considerada.

4.6. Dispositivo final

De los resultados anteriores, las dimensiones inicialmente propuestas del cantiléver, son adecuadas para su uso como elementos del actuador chevrón.

Con relación al material estructural, en general, la respuesta con Silicio y Polisilicio es similar. En el caso de Si_4N_3 , los parámetros tienen mayores valores con el incremento de temperatura.

Para el diseño del cantiléver puede utilizarse Silicio, el cual es el material más común en los procesos de fabricación, manteniendo un comportamiento similar a los otros materiales, suficiente para los propósitos de este trabajo.

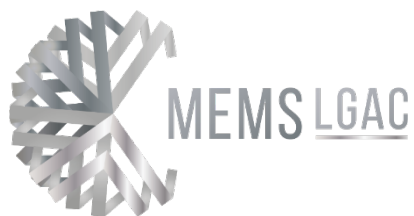

Por lo tanto, el diseño final es equivalente al diseño preliminar (Figura 4.1).



CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN

En este capítulo se diseña al microactuador Chevrón, a utilizar como elemento de la micropinza.



5. Diseño del microactuador Chevrón

5.1. Especificaciones de diseño

5.1.1. Selección de la tecnología

Este dispositivo puede ser implementado en la tecnología PolyMEMS-INAOE, la cual se describe en el anexo A. Bajo los ajustes respectivos, puede ser implementado en otra tecnología, de acuerdo con sus reglas de diseño.

5.1.2. Determinación de los materiales

Una vez realizada la validación del modelo teórico con la simulación, se realizará la simulación utilizando los mismos materiales que en el caso del microcantiléver, con la finalidad de analizar la factibilidad de uso de los mismos.

5.1.3. Selección de los componentes

Los componentes a utilizar son los convencionales de este tipo de microactuador: Anclas, brazos y flecha.

Las anclas son utilizadas para sujeción de uno de los lados de los brazos, mientras que la flecha es el elemento que se desplaza ante la deformación sufrida por los brazos.

De manera simplificada, puede decirse que el Chevrón es un arreglo de cantiléver, mediante el cual, se incrementa tanto la fuerza, como el desplazamiento.

5.1.4. Determinación de requerimientos y restricciones

El microactuador Chevrón es excitado en las anclas por un potencial eléctrico o una fuente de alimentación térmica. Esta excitación por el coeficiente de expansión térmica del material y al efecto Joule genera una deformación o

desplazamiento y una fuerza direccional sobre el eje Y. Este principio de funcionamiento permite proponer las dimensiones de la estructura, así como el material estructural de la misma.

Las anclas además de funcionar como elementos de sujeción, son utilizadas para alimentar a la estructura, ya sea mediante una fuente de voltaje o una fuente de energía térmica, por lo que deben ser lo suficientemente robustas. Las reglas de diseño proporcionan el tamaño mínimo de las mismas. Sobre el tamaño de brazos, debe cuidarse que tengan un largo excesivo y un ancho muy delgado, puesto que tenderían a colapsarse o bien a fracturarse, respectivamente.

La separación entre brazos también es importante, para evitar el traslape de los mismos, cuando el dispositivo se encuentra en funcionamiento. De estudios previamente realizados se utiliza una separación de 13 μm (Varona, Tecpoyotl-Torres, & Hamoui, 2007).

Nuevamente, debe evitarse el uso de altas temperaturas, ya que no es necesario, además de que ellas limitarían a las posibles aplicaciones. Los cantiléver del capítulo anterior, no requerían más allá de 100°C.

5.2. Diseño preliminar del Chevrón

Para el diseño del actuador, puede utilizarse la ecuación 62, para calcular el desplazamiento de la flecha, la fuerza de actuación con el que se desplaza el microactuador y la rigidez o constante de rigidez del dispositivo.

En este caso, partiremos de las dimensiones utilizadas en (Varona, Tecpoyotl-Torres, & Hamoui, 2007), y haremos aproximaciones preliminares a partir de dos brazos (Figura 5.1.), para observar su comportamiento.

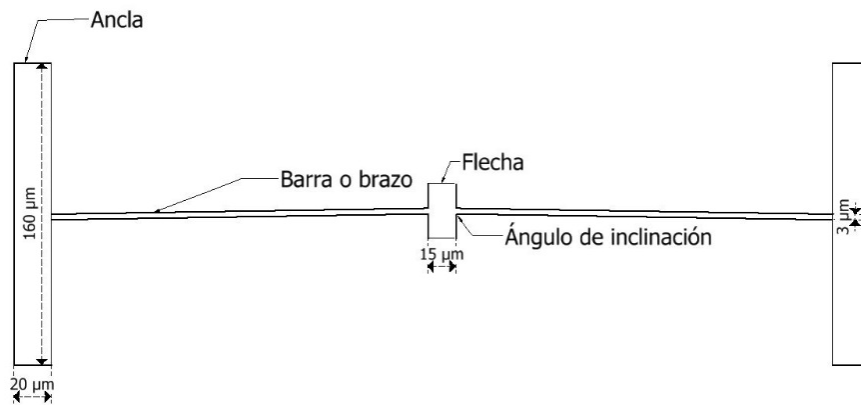


Figura 5-1 Microactuador Chevrón de dos brazos.

5.3. Resultados

5.3.1. Resultados de la simulación

La simulación es desarrollada en Ansys Workbench, se asigna como temperatura ambiente 22 °C, la misma que por default establece el programa. En la Figura 5.2 se muestra a la deformación total del dispositivo, considerando un ángulo de inclinación en los brazos de 0.9° y como material estructural el Silicio. Se alimenta con una fuente de energía térmica de 100 °C. Se utiliza una fuente de energía térmica, con la finalidad de poder realizar la comparación de resultados con el modelo teórico.

5.4. Comparación

Con la intención de dar robustez a los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de manera teórica. Se llevaron a cabo dos modelos para las simulaciones del dispositivo, un dispositivo en 2D y otro en 3D.

En la Tabla 5.1 se presentan las ilustraciones de las simulaciones del dispositivo Chevrón, donde se fueron incrementando el número de brazos del dispositivo. La columna de la izquierda de la Tabla es la representación del dispositivo en un ambiente 2D y la columna derecha de la Tabla en un ambiente 3D.

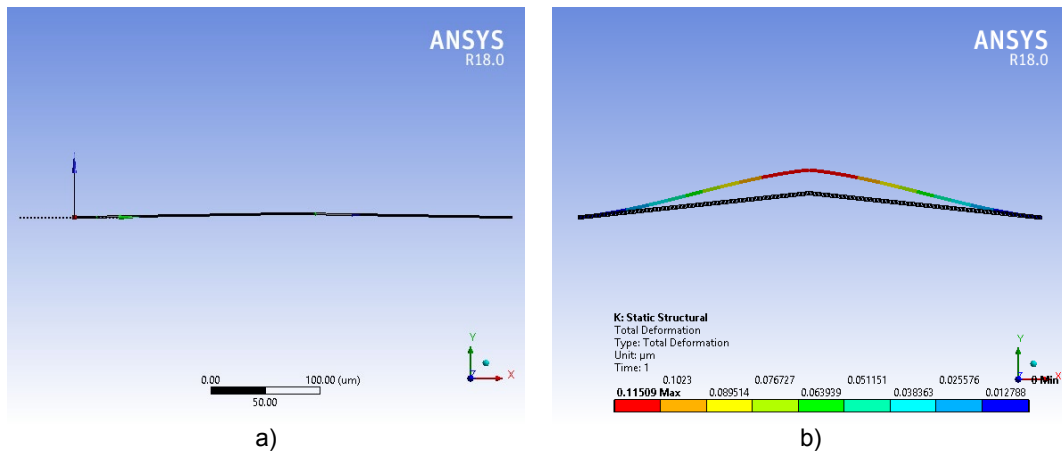
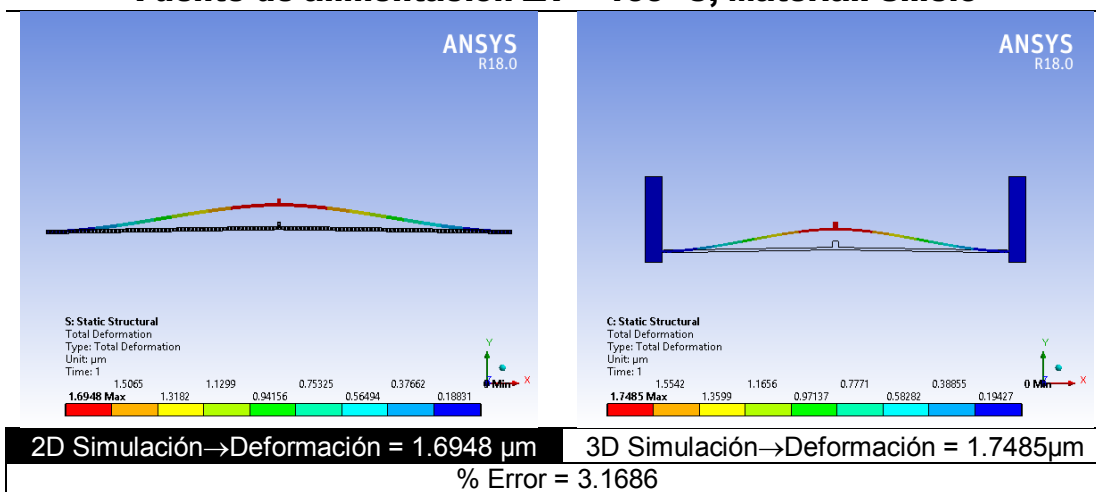


Figura 5-2 a) Microactuador Chevrón en 2D y b) respuesta de la simulación del Microactuador Chevrón.

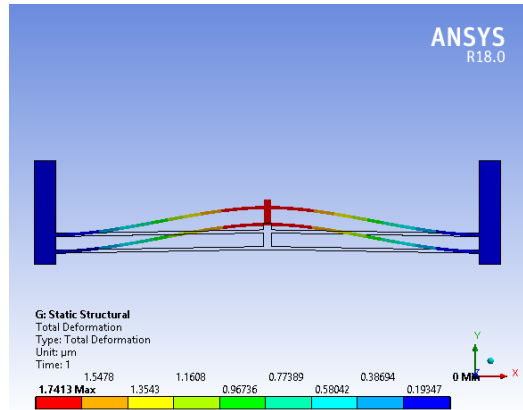
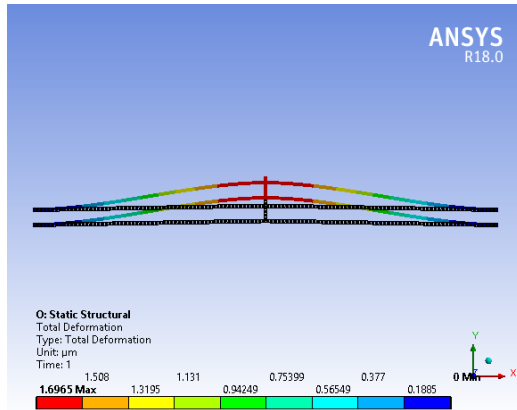
En la columna de la izquierda de la Tabla 5.1, la geometría se crea a partir de la combinación de líneas, donde cada brazo del dispositivo es una línea. En la extrucción se asignan solamente las dimensiones transversales o el área de la sección transversal de los brazos. Mientras tanto en la columna de la derecha de la Tabla, la geometría se crea totalmente en 3D, iniciamos trazando el dispositivo con sus dimensiones correspondientes para solamente dar un espesor o extrucción. En la simulación, para mantener fijo todos los brazos es necesario fijar todo el pad o bloque que se encuentra en los extremos del microactuador Chevrón.

Tabla 5-1 Tabla de resultados del microactuador Chevrón en 2D y 3D .

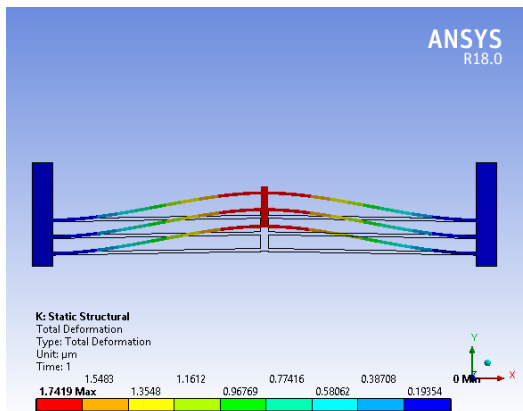
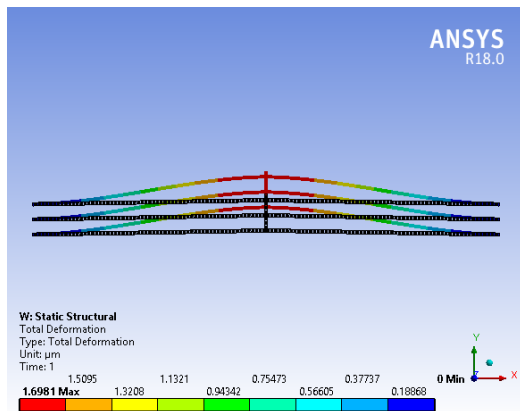
Fuente de alimentación $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, Material: Silicio



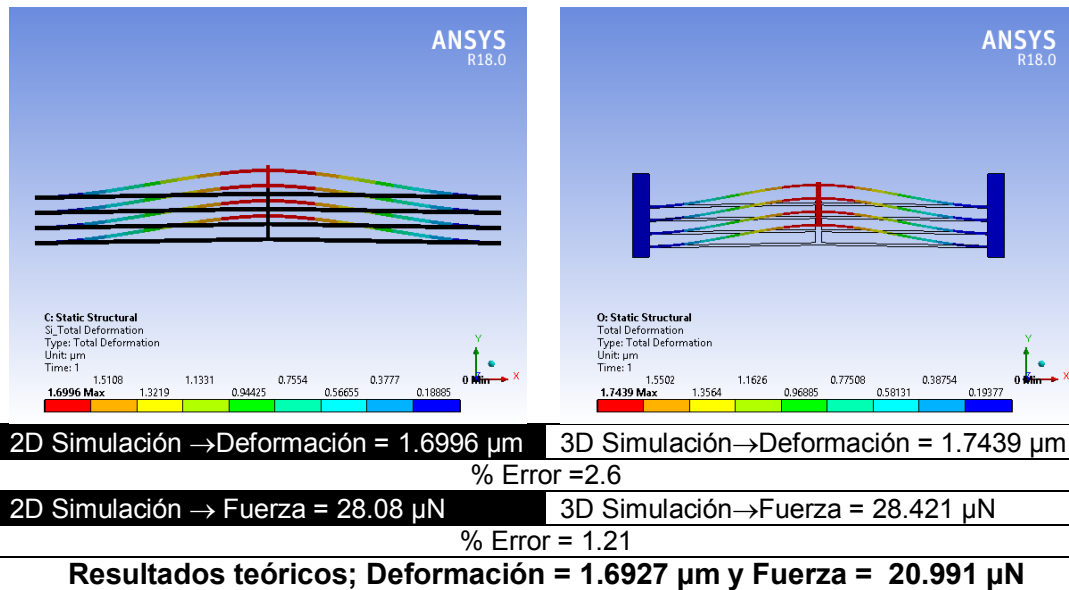
| | |
|--|--|
| 2D Simulación → Fuerza = 7.021 μN | 3D Simulación → Fuerza = 7.089 μN |
| % Error = 968.52 e-3 | |
| Resultados teóricos; Deformación = 1.693 μm y Fuerza = 6.997 μN | |



| | |
|--|--|
| 2D Simulación → Deformación = 1.6965 μm | 3D Simulación → Deformación = 1.7413 μm |
| % Error = 2.64 | |
| 2D Simulación → Fuerza = 14.07 μN | 3D Simulación → Fuerza = 14.196 μN |
| % Error = 895.5e-3 | |
| Resultados teóricos; Deformación = 1.6927 μm y Fuerza = 13.999 μN | |



| | |
|--|--|
| 2D Simulación → Deformación = 1.6981 μm | 3D Simulación → Deformación = 1.7419 μm |
| % Error = 2.57 | |
| 2D Simulación → Fuerza = 21.044 μN | 3D Simulación → Fuerza = 21.33 μN |
| % Error = 12.59 e-3 | |
| Resultados teóricos; Deformación = 1.6927 μm y Fuerza = 20.991 μN | |



Finalmente en la Figura 5.3, se muestran los resultados obtenidos sobre la deformación y la fuerza para el caso de 16 brazos.

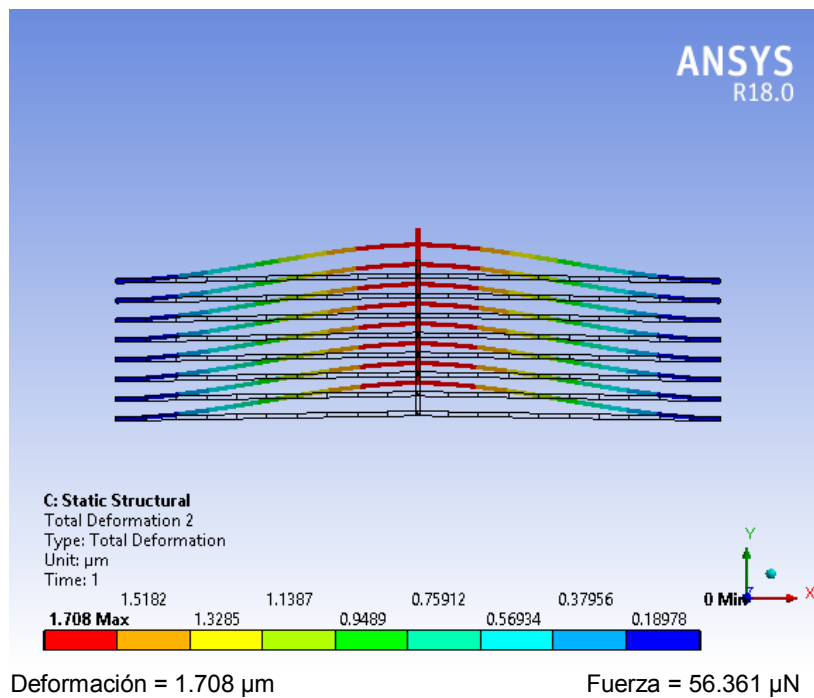
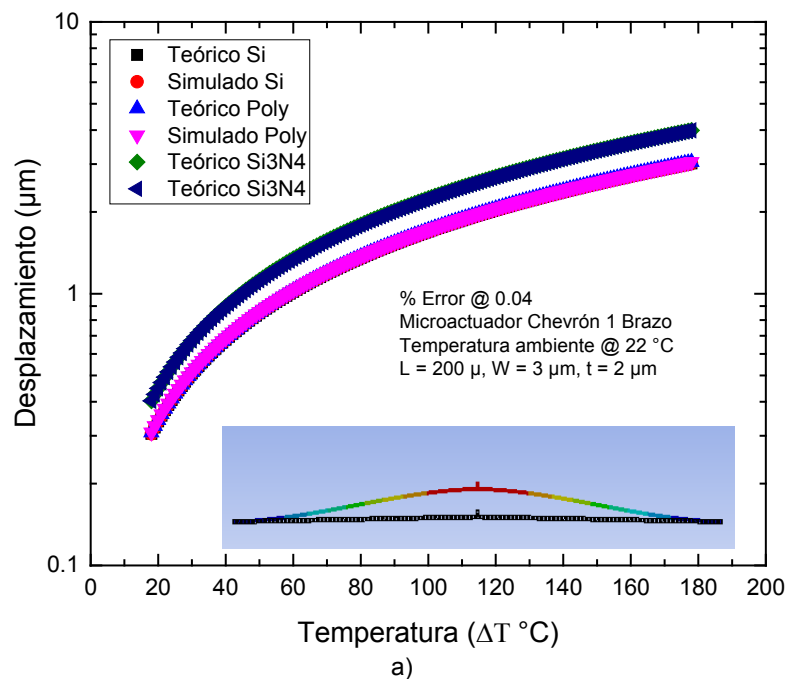


Figura 5-3 Resultados de la simulación para el actuador chevrón de Silicio de 16 brazos.

Una vez realizada la validación de la técnica de simulación con las ecuaciones de operación del dispositivo Chevrón, pasamos al siguiente nivel de simulación.

El dispositivo es sometido a un barrido en gradiente de temperatura de 40 °C a 200 °C, con una temperatura ambiente de 22 °C, cada brazo tiene una longitud ($L = 200 \mu\text{m}$), el ancho del brazo de $3 \mu\text{m}$ y el grosor de $2 \mu\text{m}$. Se asignaron como material estructural el Silicio, el Polisilicio y el Nitruro de Silicio.

Las gráficas mostradas en la Figura 5.4, muestran a la parametrización de la fuerza y el desplazamiento del microactuador Chevrón de un solo brazo con un ángulo de inclinación de 0.9° con respecto al eje X. El margen de error de los resultados del desplazamiento entre los valores calculados y los obtenidos en la simulación son muy pequeños aproximadamente de 0.04 %, la ecuación utilizada para el cálculo de la deformación o desplazamiento en la flecha del microactuador Chevrón, así como la asignación de los condiciones de frontera nos dan certeza de su validez para representar correctamente el comportamiento debido a una fuente de alimentación térmica del dispositivo.



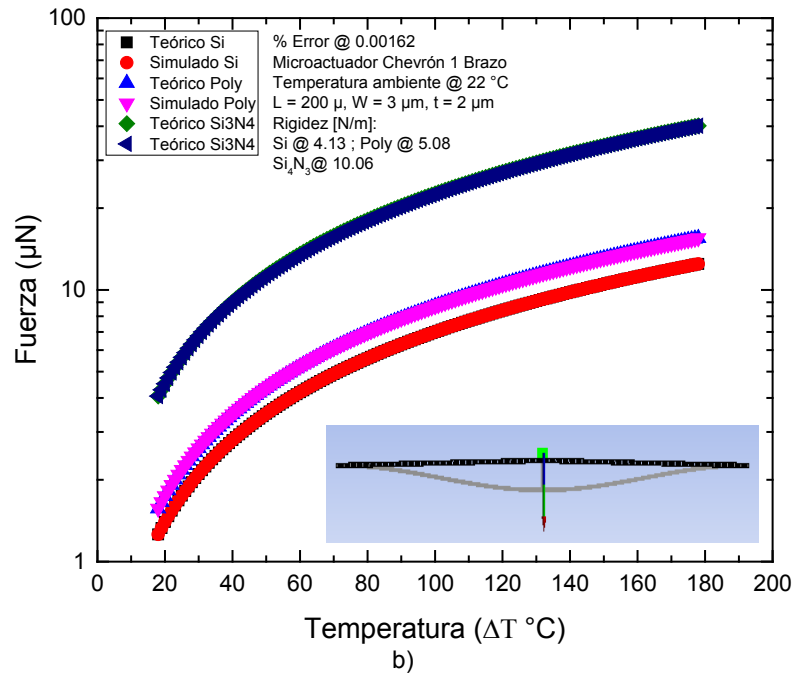
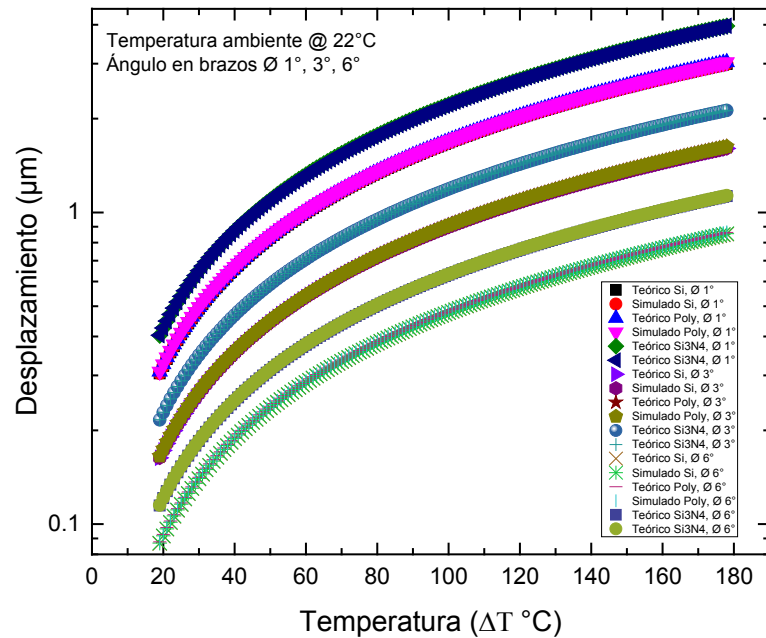


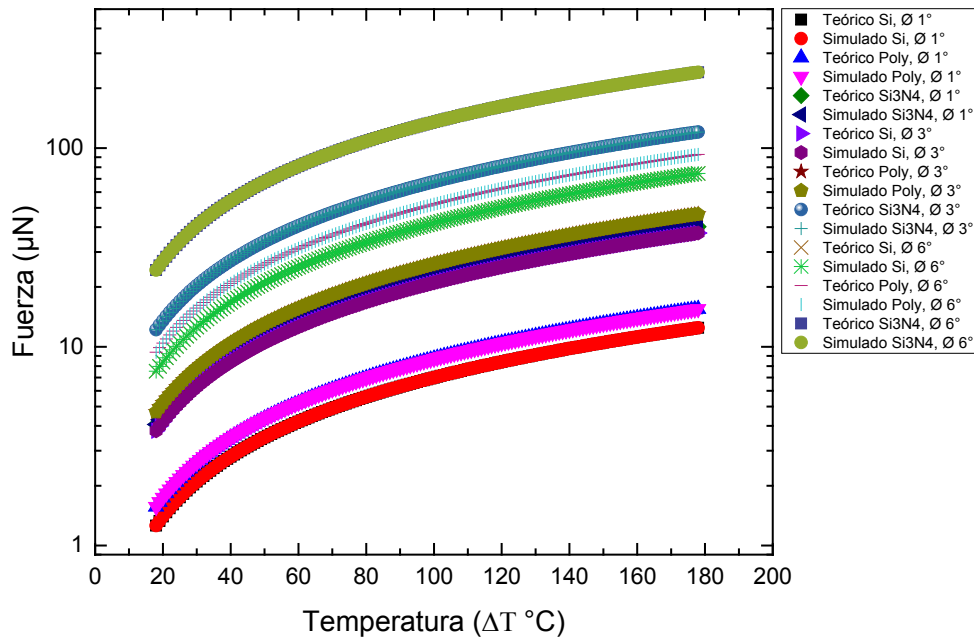
Figura 5-4 Gráfica del microactuador Chevrón con brazo $\angle 0.9^\circ$, a) barrido en temperatura vs desplazamiento y b) barrido en temperatura vs fuerza

Con la simulación de este dispositivo a 0.9° de inclinación de sus brazos, el siguiente paso será desarrollar tres modificaciones en el ángulo de inclinación de los brazos del dispositivo, a 1° , 3° y 6° con respecto al eje X. Llevándose a cabo las correspondientes simulaciones en deformación y fuerza de actuación del microactuador, así mismo realizaremos las comparaciones de los resultados teóricos, ver Figura 5.5.

De la Figura 5.5b, la rigidez para el dispositivo con ángulo de inclinación $\angle 1^\circ$ con material de Si, es ~ 4 N/m, para el material de Polisilicio, de ~ 5 N/m y para el material de Nitruro de Silicio (Si_3N_4), de ~ 10 N/m. De tal manera que para el dispositivo con ángulo de inclinación $\angle 3^\circ$ la rigidez para el Si ~ 23 N/m, Polisilicio ~ 28 N/m y $\text{Si}_3\text{N}_4 \sim 56$ N/m. Finalmente para un $\angle 6^\circ$ la rigidez para el Si ~ 86 N/m, Polisilicio ~ 106 N/m y $\text{Si}_3\text{N}_4 \sim 211$ N/m



a)



b)

Figura 5-5 Gráfica del microactuador Chevrón con diferentes ángulos de inclinación, \angle 1°, 3° y 6°
a) barrido temperatura vs desplazamiento b) barrido temperatura vs fuerza

Los márgenes de error entre cada uno de los parámetros tanto en la simulación como los calculados teóricamente son muy pequeños es por ello que en las gráficas no se pueden distinguir, ya que se traslapan.

5.5. Análisis de parámetros de desempeño

De los resultados obtenidos, puede observarse que utilizando Silicio como material estructural, del actuador Chévron de 16 brazos:

El desplazamiento se incrementa notablemente, con el incremento de temperatura, con el barrido de 20° a 180°C, se observa que después de 120° esta tendencia decrece, de tal manera que a 120° el desplazamiento es de 1.2 μm , mientras que a 180° es de 1.3 μm .

En el análisis con diferentes materiales, se observa que la fuerza presenta un comportamiento similar al del desplazamiento, observándose un crecimiento menor a partir de 120° C. Los mayores valores corresponden al Si_4N_3 . A 120° C, el valor de la fuerza es de 20 μN , mientras que para Si es de 10 μm y para PolySi de 10.5 μm . Como ha sucedido anteriormente, los valores para los dos últimos materiales son cercanos.

En los resultados de la simulación del actuador Chevrón con 16 brazos, implementados con Si_4N_3 , Polisilicio y Silicio, se observa que: Si_4N_3

Con relación al ángulo entre los brazos y las anclas, o bien la flecha, la dependencia con la rigidez es inversamente proporcional al incremento en la apertura del ángulo. Por lo que, es recomendable utilizar el menor valor.

Conforme el ángulo sea menor, de acuerdo a la observación anterior, mayor es el desplazamiento logrado, el cual también se incrementa conforme se incrementa la temperatura.

Los menores valores de desplazamiento estuvieron para Si_4N_3 , mientras que los valores mayores correspondieron a Silicio.

Por otro lado, la fuerza es menor para ángulos menores y mayor para 6°.

De las observaciones realizadas en los puntos anteriores, se sugiere usar:

- Un ángulo de aproximadamente 1°
- Un rango de temperatura no mayor a 120°C

- Utilizar Silicio como material estructura.

5.6. Dispositivo final

De acuerdo a las recomendaciones de la sub-sección anterior, el dispositivo final es el mostrado en la Figura 5.4, implementado en Silicio.

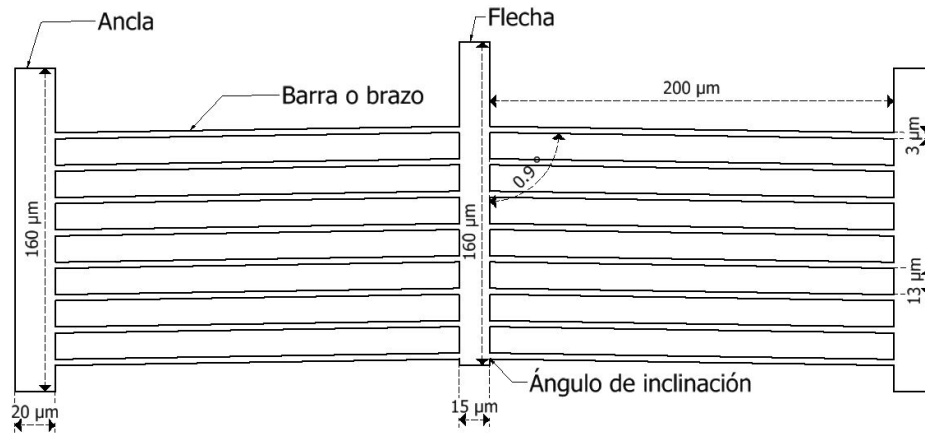


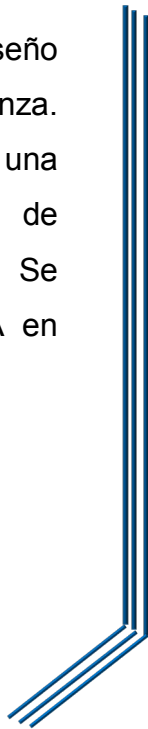
Figura 5-6 Diseño final del microactuador chevrón.



CAPÍTULO 6

DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZAS

En esta sección iniciamos con un diseño preliminar de una micropinza. Posteriormente, se desarrolla una optimización estructural y de operatividad del dispositivo. Se caracteriza al dispositivo por FEA en Ansys Workbench.



6. Diseño, simulación y caracterización de micropinzas

6.1. Especificaciones de diseño

Con los resultados obtenidos en secciones anteriores; del microcantilever y del microactuador Chevrón, se procede a realizar los correspondientes ajustes estructurales y de diseño para ser implementados a un dispositivo complejo, la micropinza. Estas especificaciones de diseño están descritas en las Figuras 6.1 y 6.2 respectivamente.

6.1.1. Determinación de la tecnología

Este dispositivo puede ser implementado en la tecnología PolyMEMS-INAOE o por la tecnología internacionalmente utilizada PolyMUMPS, los cuáles se describen en el anexo A. Bajo los ajustes respectivos, puede ser implementado en otras tecnologías, de acuerdo al material estructural empleado y a las reglas de diseño.

6.1.2. Determinación de los materiales

Se utilizará el silicio, como material estructural. Con la finalidad de analizar la factibilidad de otros materiales, se analiza también el uso de Polisilicio y Nitruro de Silicio.

6.1.3. Selección de componentes de la micropinza

Para la implementación de la micropinza, se utilizará al microactuador Chevrón analizado en el capítulo 5.

El actuador Chevrón tiene un movimiento direccional, *in plane*, definido por los ángulos de inclinación con los que están diseñados los brazos, ver Figura 6.1b. Surge la idea de aprovechar este comportamiento para implementar

elementos de soporte y amplificación, que permitan colocar estructuras en la parte inferior y superior del microactuador, haciendo analogía a una micropinza.

Este comportamiento se efectúa debido a la polarización térmica o eléctrica del microactuador Chevrón en sus anclas o pads, ver Figura 6.1a, que por el efecto de las propiedades mecánicas del material, tales como, el coeficiente de expansión térmica, el módulo de Young y la razón de Poisson principalmente, permiten el desplazamiento de la flecha. El movimiento de la flecha en la parte central del microactuador da lugar a la idea de aprovechar dicho desplazamiento y colocar elementos estructurales que propicien al cierre y apertura de estos elementos instalados.

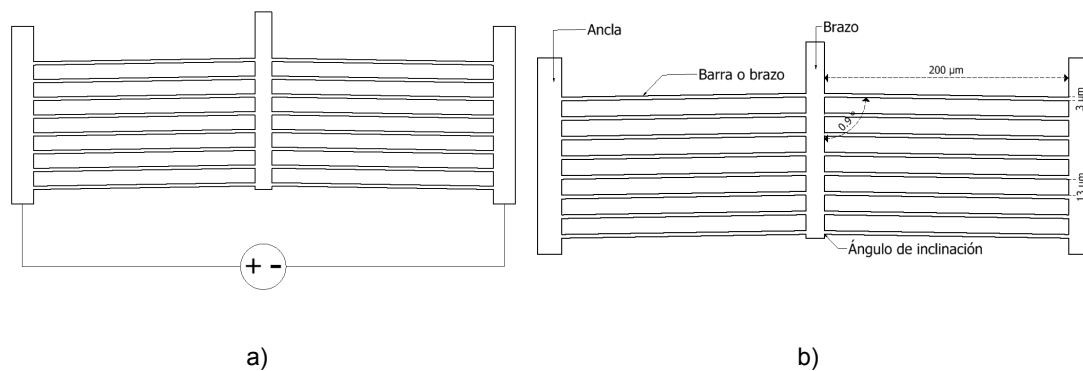


Figura 6-1 a) Alimentación por un potencial eléctrico en el microactuador Chevrón, b) descripción de los elementos del microactuador Chevrón

6.1.4. Determinación de requerimientos y restricciones

El diseño y la implementación de los elementos de ajuste que dieron origen a la micropinza se desarrolló en Autodesk Inventor 2019.

Una de las condiciones de frontera es la alimentación y ésta se realiza en las anclas del dispositivo, ver Figura 6.1a. La alimentación puede ser térmica, eléctrica o mecánica. En esta oportunidad la alimentación se desarrolló con un potencial eléctrico de 5 V para las simulaciones iniciales, el material estructural seleccionado para las primeras pruebas es el Silicio a una temperatura

ambiente de operación de 22 °C, asignada por default en Ansys, con un espesor total del dispositivo micromanipulador de 2 μm .

6.2. Diseño preliminar

La adaptación y asignación de elementos al dispositivo Chevrón, genera al diseño preliminar de la micropinza, la cual se puede observar en la Figura 6.2.

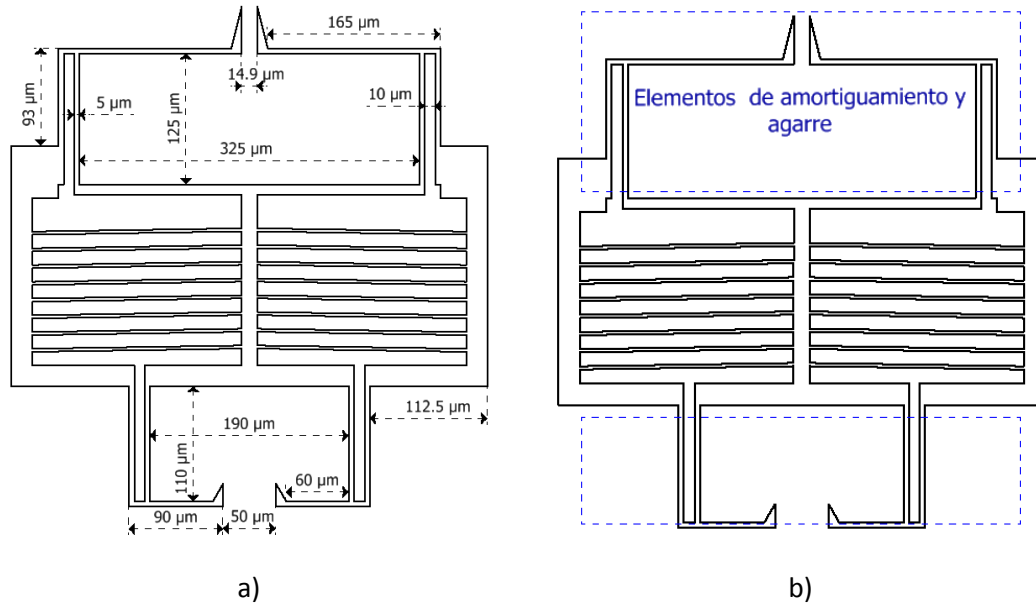


Figura 6-2 a) Dimensiones de la micropinza con microactuador Chevrón y b) elementos de amortiguamiento integrados.

6.3. Resultados de la simulación

Para verificar su comportamiento y los resultados de los parámetros de operación con los elementos ya instalados, la simulación se realizó por elemento finito en Workbench, ver Figura 6.3.

En la simulación por FEA, al dispositivo se le asignó un mallado con una preferencia física mecánica, controlada por el programa, una relevancia de 100, con una cantidad de elementos en malla de 37395 y 81463 nodos. De las propiedades intrínsecas de este dispositivo micromanipulador, se tiene al volumen, que es de 85 920 μm^3 y una masa total del dispositivos de 2.0011e-10 kg.

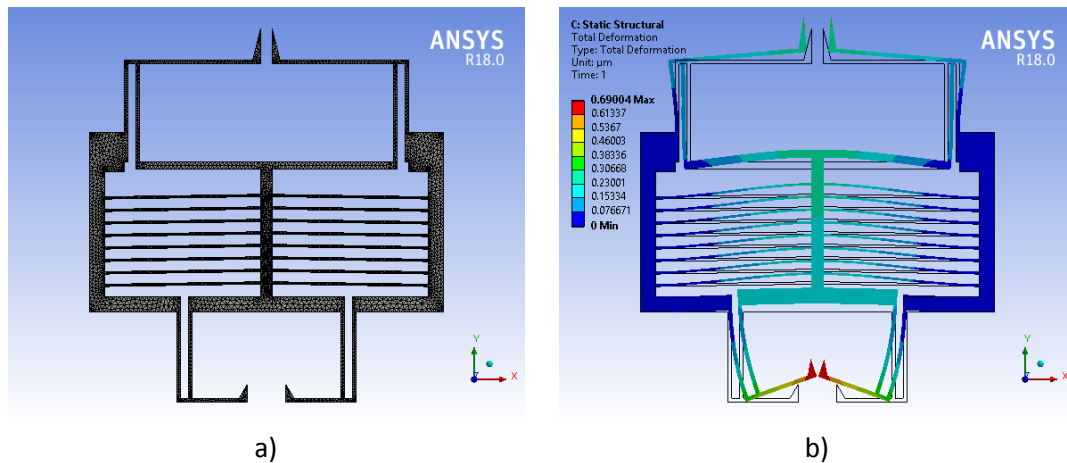


Figura 6-3 a) Mallado de la micropinza b) simulación de la micropinza

Cabe resaltar que los elementos colocados en la parte inferior y superior de la micropinza tienen el diseño particular a un microactuador de brazos tipo U.

Como puede observarse en los resultados preliminares de la micropinza, ver Figura 6.3. La deformación en los brazos del dispositivo, principalmente en la parte inferior, las pinzas no presentan un diseño estructuralmente uniforme que permita una manipulación correcta de algún microobjeto a elemento a sujetar, ya que estas pinzas al momento de la actuación presentan un pandeo muy pronunciado, que no permite tener un sujeción adecuada.

En la Tabla 6.1, se presentan los resultados preliminares de la micropinza de sus parámetros importantes de operación tales como, el desplazamiento de las pinzas, la fuerza de sujeción o agarre, el esfuerzo provocado por la deformación estructural del dispositivo y la temperatura que se origina en las pinzas.

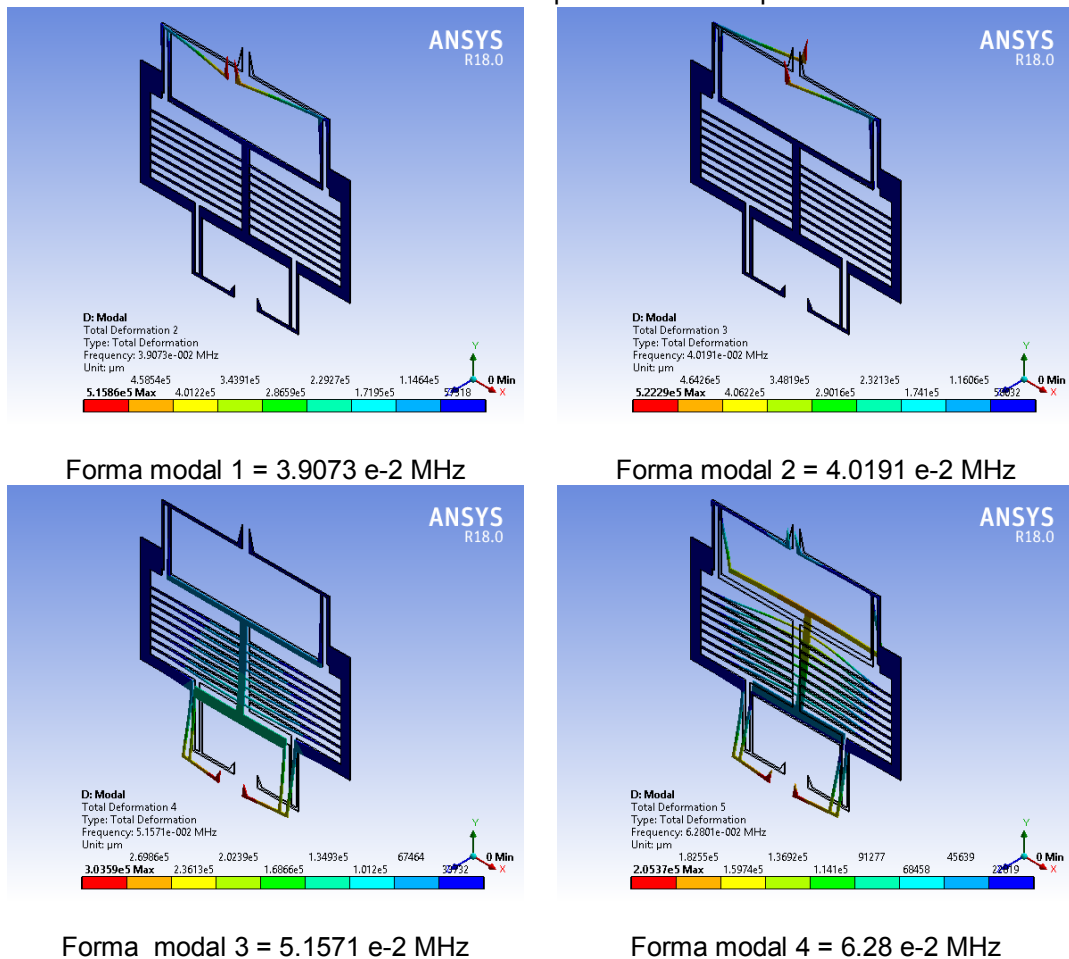
| Tabla 6-1 Tabla de resultados de la micropinza | |
|---|-------------------------------|
| Parámetros de operación | valores |
| Desplazamiento de las pinzas | 0.69 x 2 = 1.38 μm |
| Fuerza de sujeción | 6.9725 μN |
| Stress máximo | 44.244 MPa |
| Temperatura máxima en las pinzas | 174.43 $^{\circ}\text{C}$ |

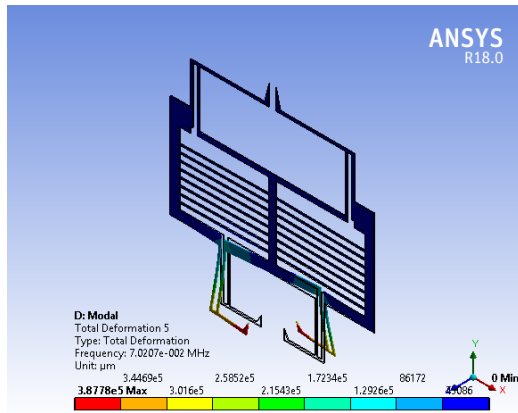
En la Tabla 6.2, se muestran las formas modales que el dispositivo presenta al ser sometido a una vibración libre sin carga. Este análisis fue llevado a cabo utilizando el análisis *Modal* de la caja de herramientas de Workbench.

Estos resultados preliminares nos indican que es necesario realizar una serie de ajustes importantes sobre todo estructurales, para mejorar el comportamiento de la micropinza y su operatividad.

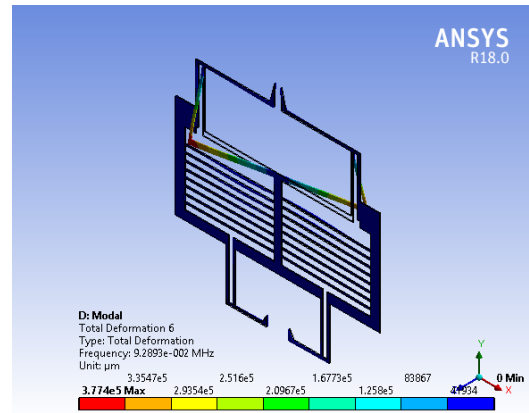
Se analiza como una solución inmediata y de acuerdo a una revisión del estado del arte, optimizar los elementos estructurales del dispositivo micromanipulador para mejorar los parámetros de interés como son el desplazamiento, la temperatura, la fuerza, la frecuencia de operación y los esfuerzos.

Tabla 6-2 Formas modales de la micropinza con sus respectivas frecuencias





Forma modal 5 = 7.02 e-2 MHz

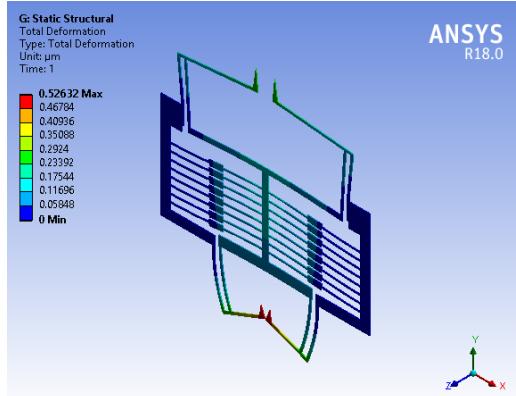


Forma modal 6 = 9.28 e-2 MHz

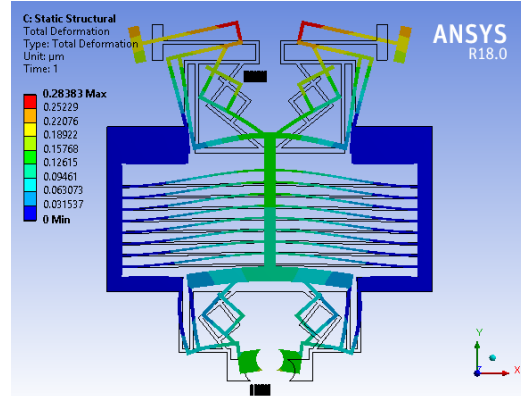
Se realizaron varias modificaciones que no presentaron un funcionamiento adecuado. Se presentan solo 10 casos, para hacer evidente el esfuerzo por realizar las mejoras necesarias (Tabla 6.3). Se agregaron por ejemplo:

- Elementos adicionales en la parte inferior y superior del microactuador chevrón.
- Modificación de la forma de las puntas superiores.
- Elementos reguladores de movimiento en los brazos del microactuador Chevrón, aplicando la teoría de Stephen Beeby. Se implementaron diferentes longitudes de regulador.
- Del mismo modo, se realizaron ajustes en el sistema de agarre de la micropinza para una mejor sujeción del elemento en cuestión, en la pinza inferior.
- Se acoplaron dos microactuadores chevrón en la parte inferior del elemento micromanipulador.
- Se agregaron elementos de soporte lateral.

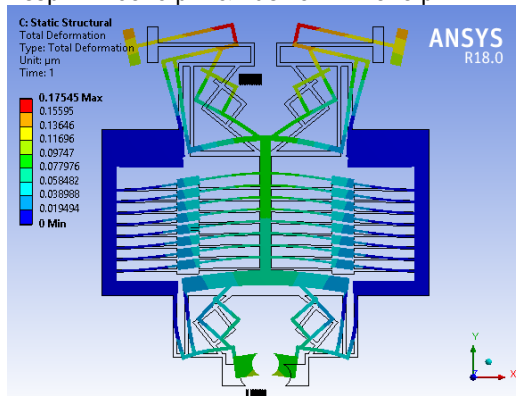
Tabla 6-3 Resultados de micropinzas modificadas estructuralmente



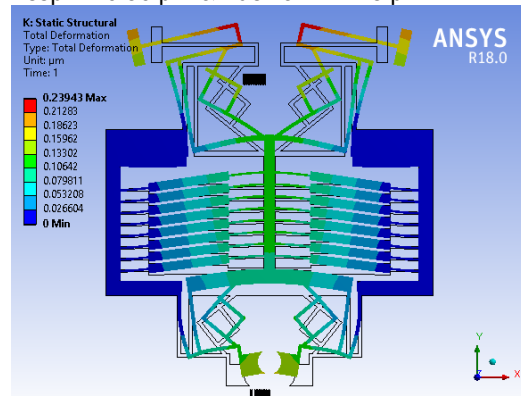
Desp. = 1.0526 μm & Fuerza = 22.545 μN



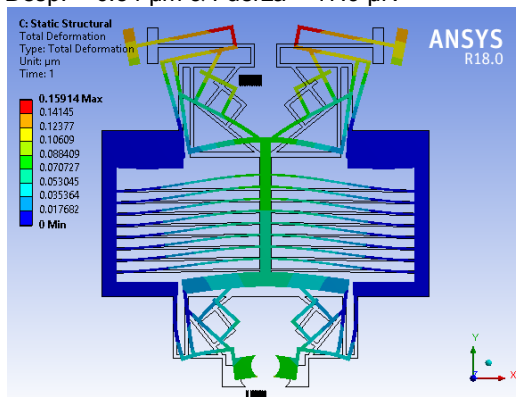
Desp. = 0.56 μm & Fuerza = 42.18 μN



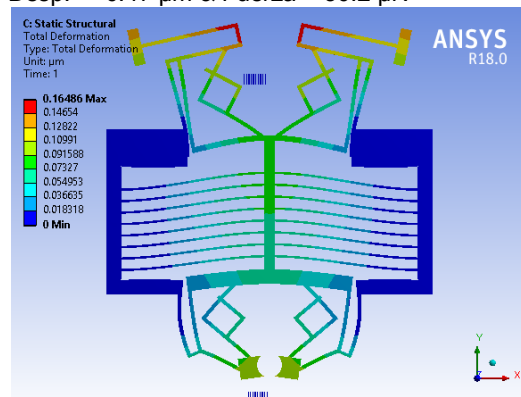
Desp. = 0.34 μm & Fuerza = 17.9 μN



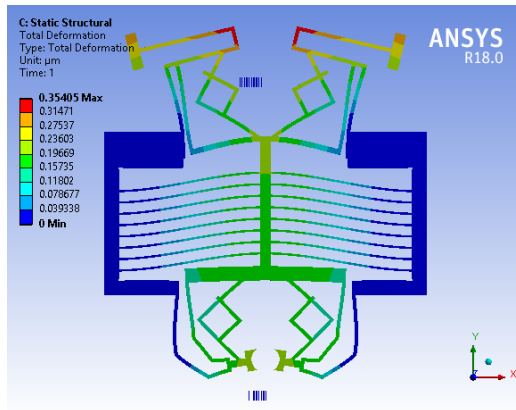
Desp. = 0.47 μm & Fuerza = 30.2 μN



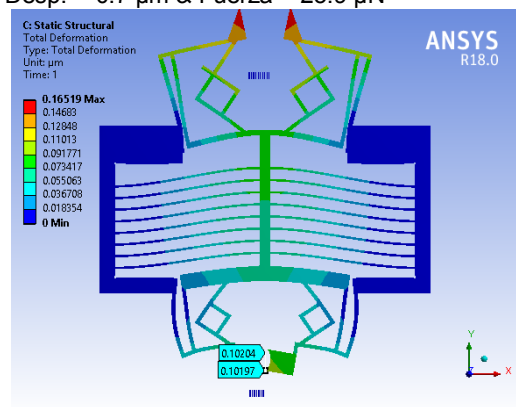
Desp. = 0.31 μm & Fuerza = 5.6 μN



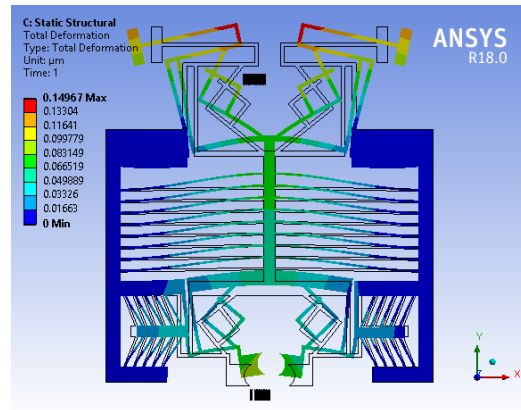
Desp. = 0.32 μm & Fuerza = 11.8 μN



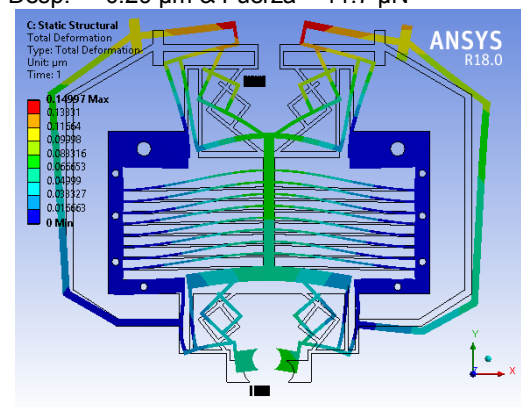
Desp. = 0.7 μm & Fuerza = 25.9 μN



Desp. = 1.2 μm & Fuerza = 13.3 μN



Desp. = 0.29 μm & Fuerza = 11.7 μN



Desp. = 0.30 μm & Fuerza = 14 μN

Después de llevar a cabo una exhaustiva búsqueda en el estado del arte para mejorar el desempeño de la micropinza, se llegó a un dispositivo mejorado con parámetros de desempeño aceptables, ver Figura 6.4. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 6.4.

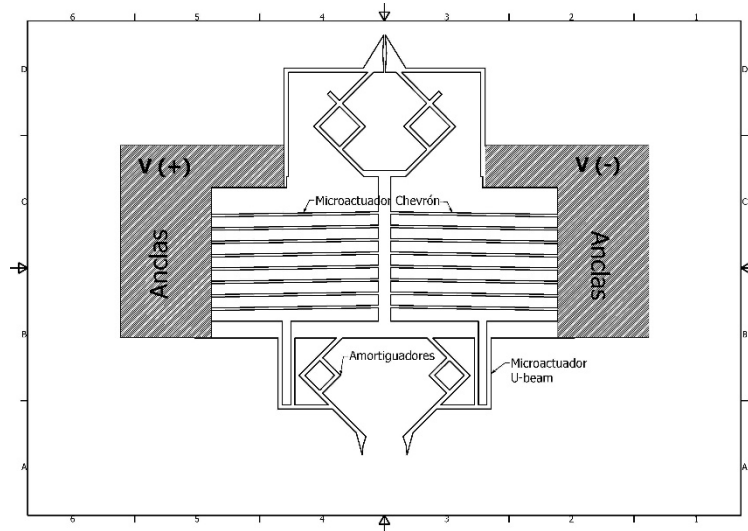
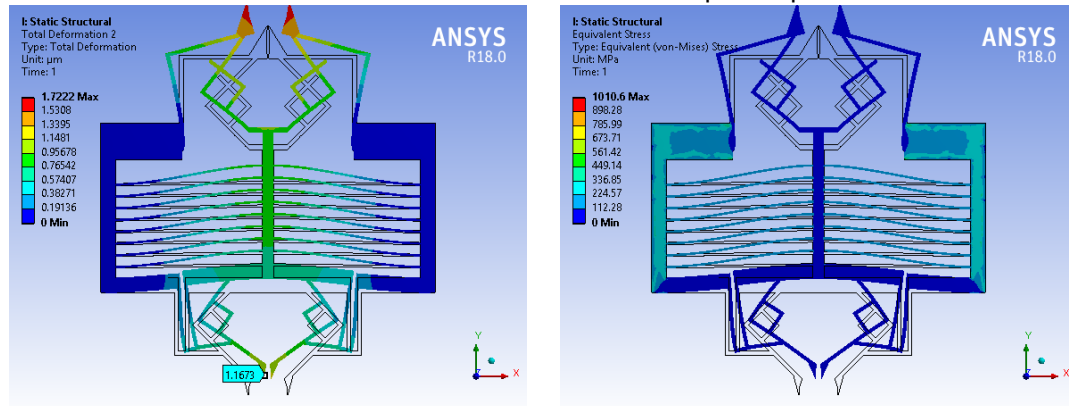


Figura 6-4 Descripción de la micropinza mejorada

Tabla 6-4 Tabla de resultados de la micropinza optimizada



Material: Silicio, voltaje de alimentación = 5 V

Desplazamiento pinza superior = 3.4 μm

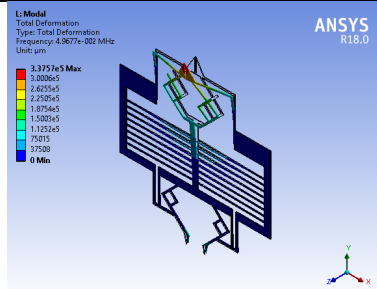
Desplazamiento pinza inferior = 2.25 μm

Fuerza sujeción pinza superior = 178.12 μN

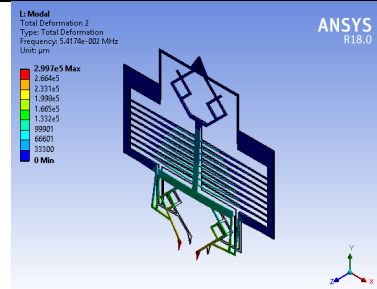
Fuerza sujeción pinza inferior = 85.8 μN

Esfuerzo máximo = 1010.6 MPa

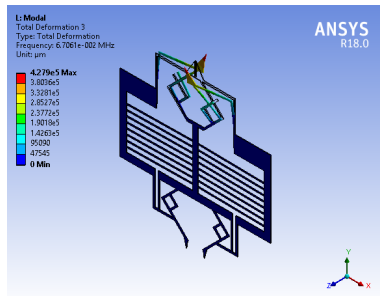
Resultado de las frecuencias correspondientes a las formas modales del dispositivo



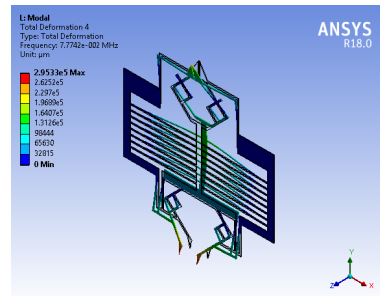
Primera forma modal = 49.6 kHz



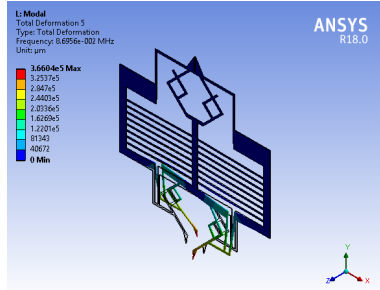
Cuarta forma modal = 54.17 kHz



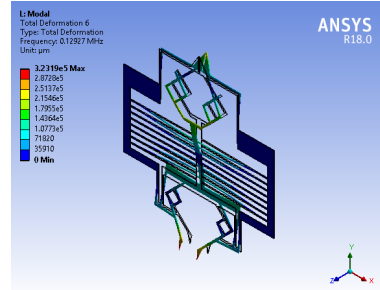
Segunda forma modal = 67.06Hz



Quinta forma modal = 77.7 kHz



Tercera forma modal = 86.9 kHz

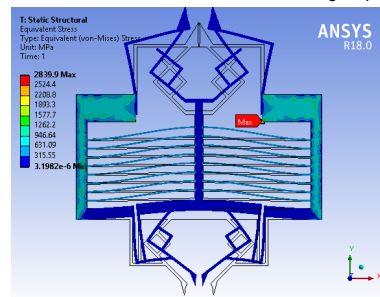
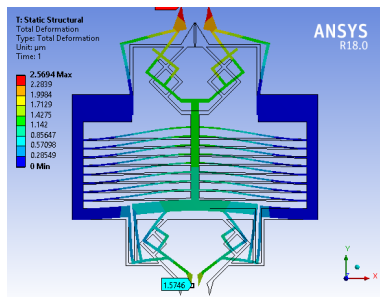


Sexta forma modal = 129.2 kHz

6.4. Comparación de desempeño utilizando otros materiales

Posteriormente el dispositivo es evaluado con Nitruro de Silicio y Polisilicio, ver Tabla 6.5 y 6.6.

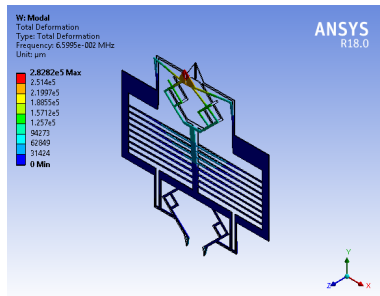
Tabla 6-5 Tabla de resultados de la micropinza optimizada con material de Ni₃Si₄



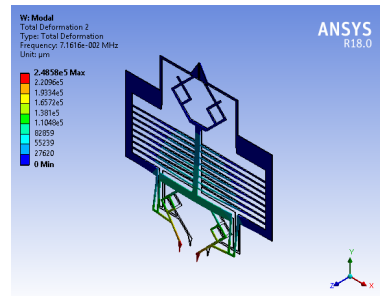
Material: Nitruro de Silicio, voltaje de alimentación = 5 V
 Desplazamiento pinza superior = 5.1 μm
 Fuerza sujeción pinza superior = 710 μN
 Esfuerzo máximo = 2839 MPa

Desplazamiento pinza inferior = 3.1 μm
 Fuerza sujeción pinza inferior = 160 μN

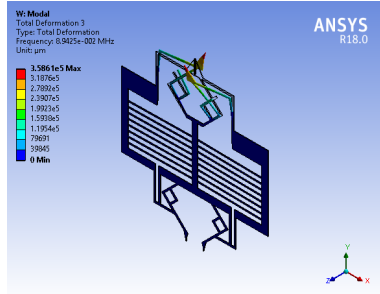
Resultado de las frecuencias correspondientes a las formas modales del dispositivo



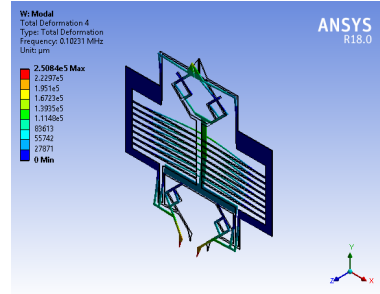
Primera forma modal = 65.9 kHz



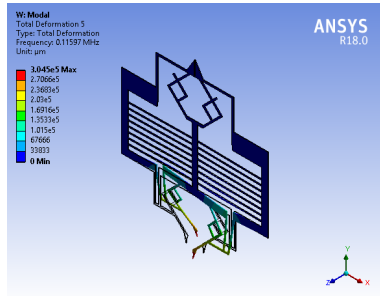
Cuarta forma modal = 71.6 kHz



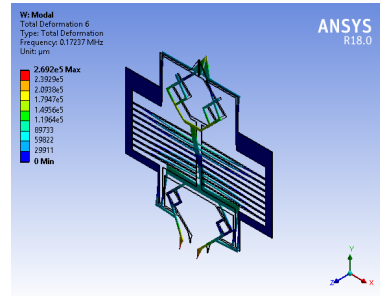
Segunda forma modal = 89.4 kHz



Quinta forma modal = 102.31 kHz

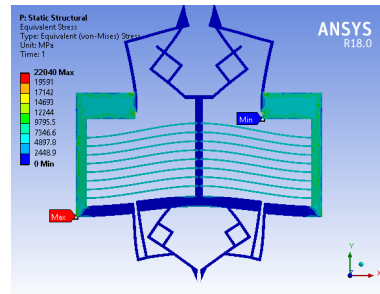
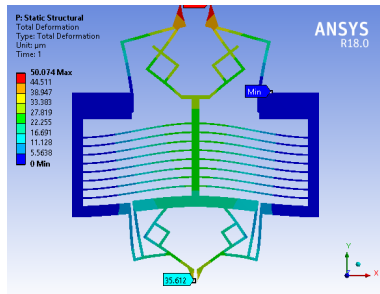


Tercera forma modal = 115.9 kHz



Sexta forma modal = 172 kHz

Tabla 6-6 Tabla de resultados de la micropinza optimizada con material de Polisilicio

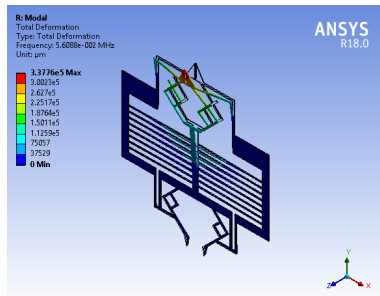


Material: Polisilicio, voltaje de alimentación = 5 V

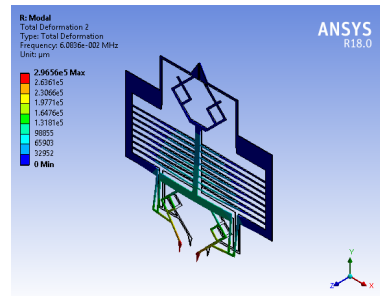
Desplazamiento pinza superior = 100 μm
 Fuerza sujeción pinza superior = 6234 μN
 Esfuerzo máximo = 22040 MPa

Desplazamiento pinza inferior = 70.2 μm
 Fuerza sujeción pinza inferior = 2905 μN

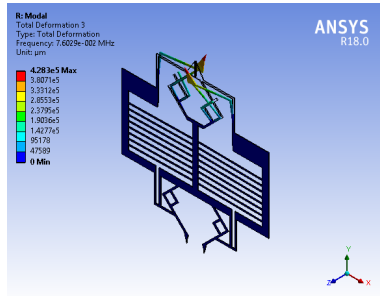
Resultado de las frecuencias correspondientes a las formas modales del dispositivo



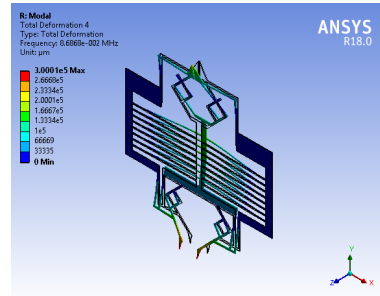
Primera forma modal = 56 kHz



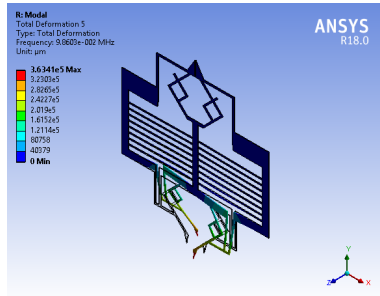
Cuarta forma modal = 6.8 kHz



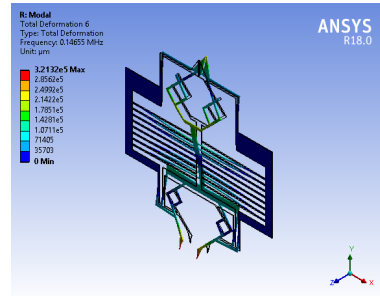
Segunda forma modal = 76 kHz



Quinta forma modal = 86.8 kHz



Tercera forma modal = 98.6 kHz



Sexta forma modal = 146 kHz

Tabla 6-6 Tabla del resumen de los resultados de la micropinza aplicando tres materiales diferentes, Silicio (Si), Nitruro de Silicio (Ni_3Si_4) y PoliSilicio

| Parámetros de operación | Micropinza Si | Micropinza Ni_3Si_4 | Micropinza Polisilicio |
|--|---------------|-----------------------|------------------------|
| Fuerza de sujeción superior (μN) | 178.12 | 710 | 6234 |
| Fuerza de sujeción inferior | 85.8 | 160 | 2905 |
| Apertura micropinza inferior (μm) | 2.25 | 3.1 | 70.2 |
| Apertura micropinza superior (μm) | 3.4 | 5.1 | 100 |
| Esfuerzo máximo (MPa) | 1010.6 | 2839 | 22040 |
| Frecuencia natural de la primera forma modal (kHz) | 49.6 | 65.9 | 56 |

6.5. Dependencia de la temperatura con el Voltaje aplicado, utilizando Silicio

Se presenta esta dependencia en la Figura 6.5.

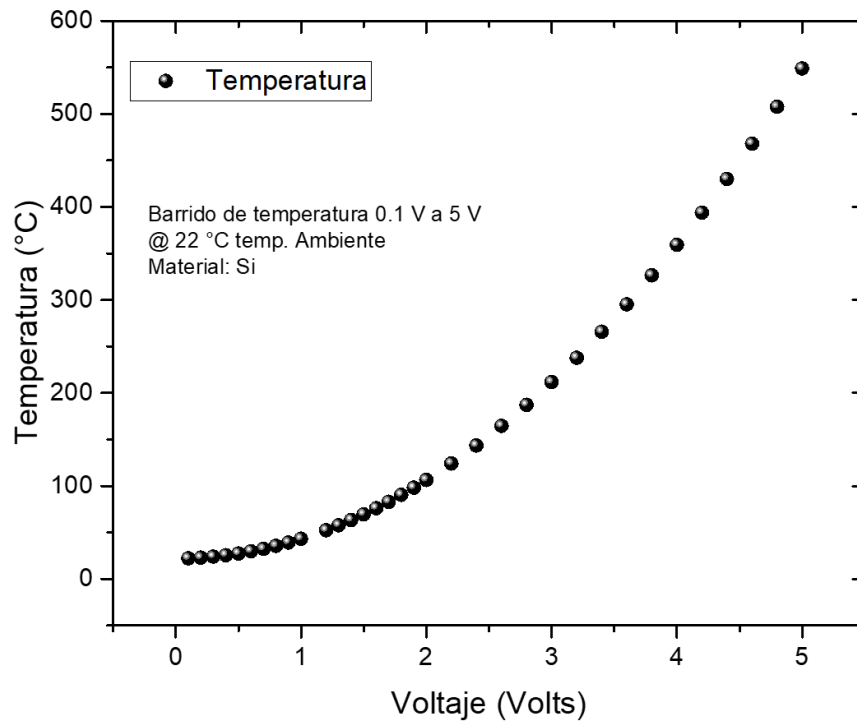


Figura 6-5 Barrido en voltaje vs temperatura

6.6. Análisis de fatiga de la micropinza de Silicio

Se utiliza al Silicio, principalmente porque es el material que más se utiliza en el proceso de fabricación de los MEMS, además de que se cuenta con los datos de esfuerzo deformación proporcionado por (Mulstein & Ritchie, 2003), Figura 6.6.

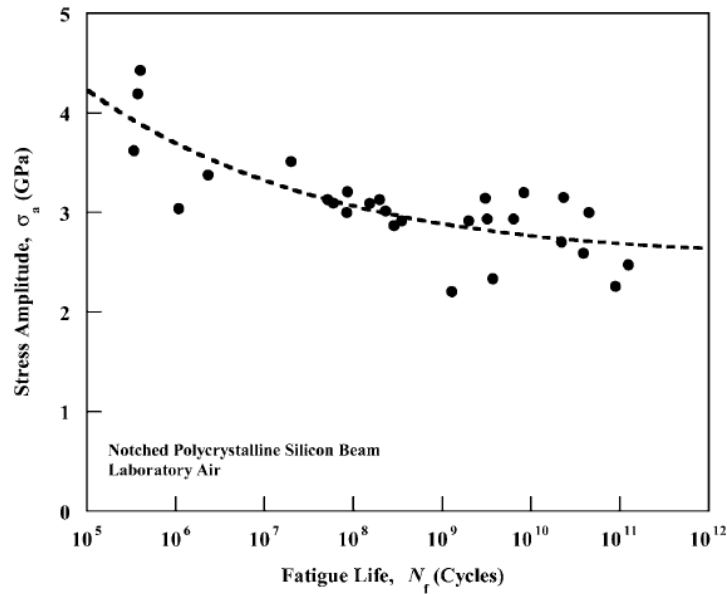


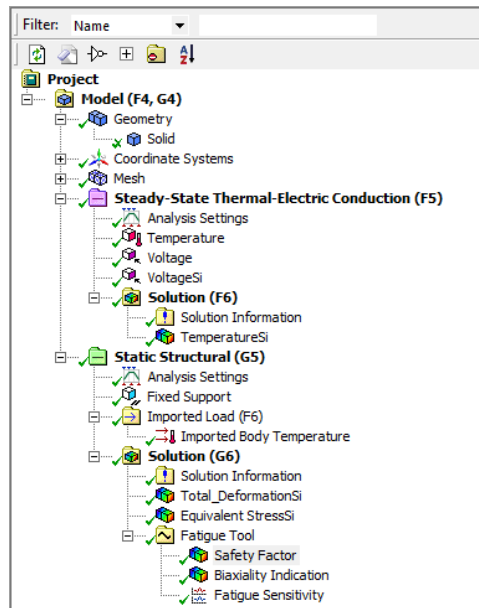
Figura 6-6 Stress-life (S/N) comportamiento a la fatiga de una película policristalina de Silicio de 2 μm a 40 kHz in laboratory air (muhlstein et al., 2001a) y (Mulstein & Ritchie, 2003)

Para el análisis por fatiga del dispositivo micromanipulador, primero calculamos el esfuerzo de Von Mises. Posteriormente, se define un tipo de análisis *Stress life*, donde el ciclo de carga y descarga para este análisis no lleva al dispositivo a la región de plasticidad. Después asignamos un *Fatigue Strength Factor* (factor de resistencia a la fatiga) de 0.85, definido en el artículo de (Mulstein & Ritchie, 2003) que va en dependencia del tipo de material, en seguida asignamos un *loading charge* (tipo de carga) *fully reversed* de amplitud constante, el cual con este análisis no se tiene que tomar en cuenta al factor de corrección promedio. Finalmente, elegimos el factor de corrección multiaxial y para ello hacemos la elección del esfuerzo de Von Mises (*Equivalent Von-Mises*), ver Figura 6.7.

| Details of "Fatigue Tool" | |
|---------------------------------------|------------------------|
| Domain | |
| Domain Type | Time |
| Materials | |
| Fatigue Strength Factor (Kf) | 0.85 |
| Loading | |
| Type | Fully Reversed |
| <input type="checkbox"/> Scale Factor | 1. |
| Definition | |
| <input type="checkbox"/> Display Time | End Time |
| Options | |
| Analysis Type | Stress Life |
| Mean Stress Theory | None |
| Stress Component | Equivalent (von-Mises) |
| Life Units | |
| Units Name | cycles |
| 1 cycle is equal to | 1. cycles |

Figura 6-7 Detalles de la caja de análisis de la herramienta para el desarrollo del análisis por fatiga

Una vez definido los elementos importantes para llevar a cabo la simulación, hacemos uso de otras herramientas contenidas en la carpeta del fatigue tool, como son el factor de seguridad (*safety factor*), gráfica de sensibilidad a la fatiga (*fatigue sensitivity*) e indicación a la biaxialidad (*biaxiality indication*) (Figura 6.8).



a)

| Details of "Safety Factor" | |
|----------------------------------|--------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | All Bodies |
| Definition | |
| Design Life | 1.e+013 cycles |
| Type | Safety Factor |
| Identifier | |
| Suppressed | No |
| Integration Point Results | |
| Average Across Bodies | No |
| Results | |
| <input type="checkbox"/> Minimum | 2.1028 |
| Minimum Occurs On | Solid |

b)

Figura 6-8 a) Árbol de simulación del dispositivo b) Características de simulación para el safety factor

En relación al factor de seguridad este nos permitirá calcular el factor con respecto a la vida calculada por Ansys y a la vida que nosotros esperamos obtener.

Para la sensibilidad a la fatiga se colocan porcentajes de acuerdo a valores mínimos y máximos, una carga cíclica, que el dispositivo se le asigna en su operación normal de trabajo.

| Details of "Biaxiality Indication" | |
|------------------------------------|-----------------------|
| [-] Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | All Bodies |
| [-] Definition | |
| Type | Biaxiality Indication |
| Identifier | |
| Suppressed | No |
| [-] Integration Point Results | |
| Average Across Bodies | No |
| [-] Results | |
| <input type="checkbox"/> Minimum | -0.99999 |
| <input type="checkbox"/> Maximum | 1. |
| Minimum Occurs On | Solid |
| Maximum Occurs On | Solid |

a)

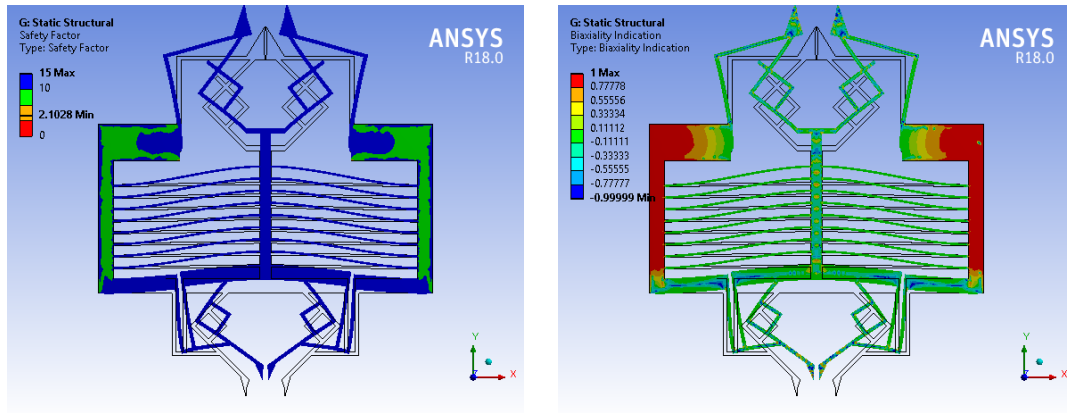
| Details of "Fatigue Sensitivity" | |
|----------------------------------|------------|
| [-] Scope | |
| Geometry | All Bodies |
| [-] Definition | |
| Sensitivity For | Life |
| Suppressed | No |
| [-] Options | |
| Lower Variation | 25. % |
| Upper Variation | 200. % |
| Number of Fill Points | 25 |
| Chart Viewing Style | Linear |

b)

Figura 6-9 a) árbol de asignación de la indicación biaxial b) asignación de los porcentaje de sensibilidad del dispositivo micromanipulador

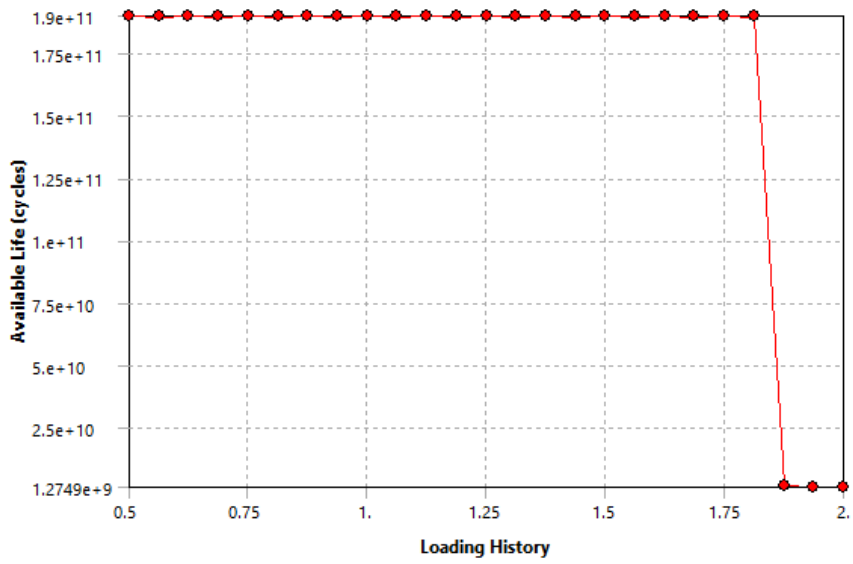
En la caja de sensibilidad a la fatiga definimos en *lower variation* un 25 % de la carga añadida al sistema o al elemento, en este caso el voltaje de asignación al dispositivo será $25\% < 5\text{ V}$, así mismo, en *upper variation* colocamos un $200\% > 5\text{ V}$.

De esta manera el resultado de estas definiciones y asignaciones se presentan en la Figura 6.8b.



a)

b)



c)

Figura 6-10 a) árbol de asignación de la indicación biaxial b) asignación de los porcentaje de sensibilidad del dispositivo micromanipulador c) gráfica de cargas cíclicas

En el *safety factor* la región en donde se esperaba menos vida es la parte máxima en donde existe mayor esfuerzo, para este caso en los pads y en donde se encuentran conectados los brazos del microactuador Chevrón.

En la gráfica de sensibilidad a la fatiga, Figura 6.10c, se presentan los ciclos de vida disponible de acuerdo con la carga en la micropinza. En el eje *Loading Story*, 0.5 equivale al 50% y 2 al 200%. Por lo tanto, en la gráfica cíclica de carga el 25% (equivalente a 1.25V) y 200% es el equivalente a 10 V, al aumentar la carga el número de ciclos va disminuyendo. En la Figura 6.10c se observa que en 175% de la carga aplicada, en este caso en 8.75 V, el número de ciclos de vida empieza a decaer.

El número máximo de ciclos de vida es 1.9×10^{11} ciclos.

6.7. Análisis de parámetros de desempeño

El diseño preliminar (Figura 6.2) fue descartado, debido a la deformación en los brazos del dispositivo, principalmente en la parte inferior. Esta pinza, al momento de la actuación, presentan un pandeo muy pronunciado, que no permitiría tener un sujeción adecuada.

Debido a que no se obtuvo una respuesta adecuada, en particular, con respecto al desplazamiento de los brazos de la pinza, por lo que una gran cantidad de aproximaciones fueron desechadas (Tabla 6.3).

En el diseño mejorado (Figura 6.4), fue analizado considerando como material estructural a Silicio, Polisilicio y Nitruro de Silicio. Con Polisilicio se tiene el mayor valor de desplazamiento, pero su frecuencia natural no es muy alta (56 kHz). Las diferencias entre los valores utilizando Silicio y Nitruro de Silicio, no son considerables (vea Tabla 6.6).

En todos los casos la apertura es mayor en la pinza superior, que en la inferior. Lo mismo sucede con la fuerza, por lo que, esto determina además a las posibles aplicaciones de esta estructura.

Como se aplica un potencial de 5V, en el caso de Silicio la temperatura de operación llega a ser 548.9°C, por lo que se sugiere limitar la alimentación a este valor, pero dependerá del tipo de elemento de sujeción a considerar.

6.8. Diseño final

De acuerdo con el funcionamiento de la pinza mejorada, mostrada en la Figura 6.4. Se obtiene el diseño final, que se muestra en la Figura 6.11, utilizando Silicio, debido a que es el material más común en la fabricación, y a sus resultados de desplazamiento y fuerza, además de que presenta un menor esfuerzo.

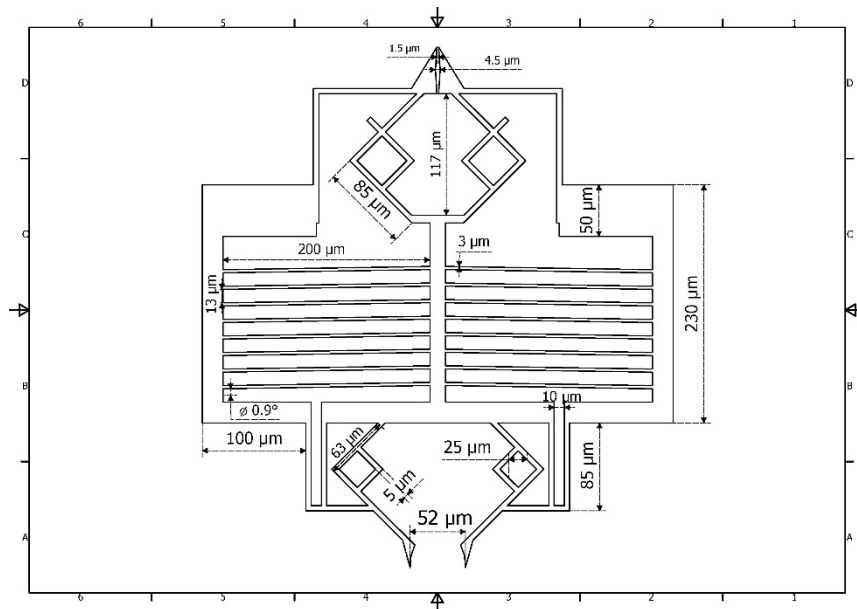
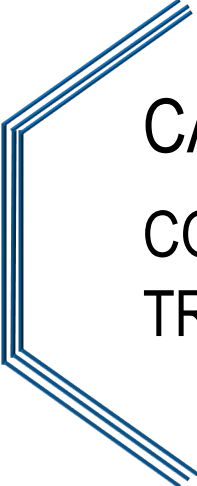



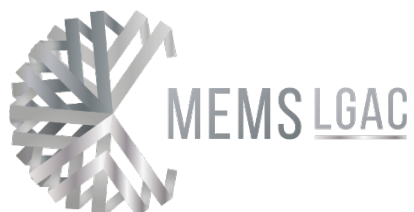

Figura 6-11 Dimensiones de la micropinza mejorada.



CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo de tesis, así como los trabajos futuros que se originaron y que se proponen.



7. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo, el objetivo general fue logrado. Esto es, se diseñó y se caracterizó una pinza electrotérmica, con optimización de parámetros: estructurales, fuerza de sujeción, apertura y cierre de la pinza.

Se cumplió con cada uno de los objetivos específicos:

- Se realizó análisis dinámico del cantiléver y del actuador Chevrón.
- Se analizaron los parámetros de desempeño del actuador chevrón.
- Se caracterizó a la micropinza y se realizaron las pruebas de optimización necesarias.
- Se desarrollaron pruebas con otro material.

Además, en el último objetivo específico, se consideró a un material adicional. Tanto en el cantiléver, el actuador Chevrón y la micropinza, las simulaciones se realizaron con Silicio, Polisilicio y Nitruro de Silicio.

6.9. Conclusiones

El diseño de dispositivos y sistemas MEM, representa un área de oportunidad. Esto, ya que pueden generarse nuevos dispositivos o sistemas complejos, o bien, pueden mejorarse los ya existentes. La introducción de nuevos materiales en las tecnologías de fabricación favorece a este objetivo, ya que sus características físicas influyen notablemente en el comportamiento de los sistemas en los que se aplican.

En la literatura no se hallaron análisis teóricos sobre el modelado completo de sistemas complejos, solo se presentan los correspondientes a elementos individualizados. Para analizar a los componentes básicos de la micropinzas, cantiléver y actuador Chevrón, se realizaron las adaptaciones necesarias, con relación a las geometrías y condiciones de frontera. Con base en esto, se

realizaron los cálculos utilizados en la comparación con los resultados de la simulación. Los niveles de error, menores al 1%, permiten observar que las aproximaciones teóricas logradas son lo suficientemente precisas. El análisis de la micropinza, se realizó mediante simulación.

La metodología propuesta es flexible, de acuerdo al nivel de complejidad de la estructura a analizar. Ya que, realizar el modelado de estructuras complejas, tiene a su vez un alto nivel de desarrollo.

En el caso del cantiléver, los parámetros de desempeño muestran un comportamiento y valores similares, al implementarse con Silicio y Polisilicio. Los parámetros tienen mayores valores para Si_4N_3 . Para el diseño del cantiléver puede utilizarse Silicio, el cual es el material más común en los procesos de fabricación y de menor costo.

En el caso del actuador Chévron de 16 brazos, el desplazamiento se incrementa notablemente, con el incremento de temperatura. En el barrido de 20° a 180°C , después de 120°C la alta tasa de crecimiento decrece, de tal manera que a 120°C el desplazamiento es de $1.2\ \mu\text{m}$, mientras que a 180°C es de $1.3\ \mu\text{m}$.

En el análisis con Si_4N_3 , Polisilicio y Silicio, se observa que la fuerza presenta un comportamiento similar al del desplazamiento, observándose un crecimiento menor a partir de 120°C . Los mayores valores corresponden al Si_4N_3 . A 120°C , el valor de la fuerza es de $20\ \mu\text{N}$, mientras que para Si es de $10\ \mu\text{m}$ y para PolySi de $10.5\ \mu\text{m}$.

Con relación al ángulo entre los brazos y las anclas, o bien la flecha, la dependencia con la rigidez es inversamente proporcional al incremento en la apertura del ángulo, por lo que se sugiere utilizar un ángulo de 0.9° .

Los menores valores de desplazamiento corresponden a la implementación con Si_4N_3 , mientras que los valores mayores correspondiente a Silicio. Por lo

que nuevamente, se sugiere la implementación con Silicio para el actuador Chevrón con 16 brazos.

Para obtener el diseño final de la micropinza, se elaboraron muchos intentos. El diseño final se propone en Silicio, debido sobre todo, a la dependencia entre el voltaje de alimentación y la temperatura. Debido a que cuenta con brazos de sujeción en la parte superior e inferior, puede decirse que es una doble pinza. El desplazamiento es adecuado para partículas $3.4 \mu\text{m}$ y de $2.25 \mu\text{m}$, por tener esta doble capacidad de sujeción. La fuerza de sujeción es de $178.12 \mu\text{N}$ y la inferior $85.8 \mu\text{N}$.

Como se aplica un potencial de 5V, en el caso de Silicio la temperatura de operación llega a ser $548.9 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que se sugiere limitar la alimentación a este valor, pero dependerá del tipo de elemento de sujeción a considerar.

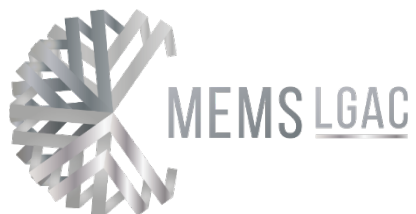
Con relación a la fatiga, considerando Silicio, a voltaje aplicado de 8.75 V, el número de ciclos de vida empieza a decaer. El número máximo de ciclos de vida antes de este valor de voltaje es $1.9 \text{ e}11$ ciclos.

6.10. Trabajo futuro

Es sugerible continuar con la implementación, y en su caso mejora, de los dispositivos mostrados en el Anexo E, los cuales han mostrado potencial de desarrollo.



BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía



- (2014). Obtenido de Yole Development:
<http://www.semi.org/eu/sites/semi.org/files/images/Eric%20Mounier%20-%20Future%20of%20MEMS.%20A%20Market%20and%20Technologies%20Perspective.pdf>
- Ahmed Bazaz, S., Khan, F., & Iqtidar Shakoore, R. (2011). Design, simulation and testing of electrostatic SOI MUMPs based microgripper. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167, 44-53. doi:10.1016/j.sna.2010.12.003
- Ando, B., Baglio, S., Savalli, N., & Trigona, C. (2011). Cascaded triple-bent-beam MEMS Sensor for contactless temperature measurements in nanoaccessible environments. *IEEE transactions on instrumentation & measurement*, 1348-1357.
- Ansys. (2006). <http://www.me.udel.edu/>.
- Baracu, A., Voicu, R., Müller, R., Avram, A., Pustan, M., Chiorean, R., . . . Dulescu, C. (2016). Design and fabrication of a MEMS chevron-type thermal actuator. *International Conferences and Exhibition on Nanotechnologies and Organic Electronics (NANOTECHNOLOGY 2014)* (págs. 25-30). AIP Conference Proceedings.
- C. E., L. G., Ren, C. L., M. Y., & Khamesee, M. B. (2008). Design and analysis of a polymeric photo-thermal microactuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 292-299.
- Caballero, A., & Kang K., Y. (2018.). The Use of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) in the Construction. <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB13324.pdf>. Consultado: 1 de marzo de 2018., 161-165.
- Caballero, A., & Yen, K. (s.f.). *The use of Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) in the construction*. Obtenido de <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB13324.pdf>
- Calleja Arriaga, W., Linares Aranda, M., Torres Jácome, A., & Báez Álvares, C. (2017). A modular and generic monolithic integrated MEMS fabrication process. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, 30-39.
- Carter, Cowen, Hardy, Mahadevan, Stonefield, & Wilcenski. (2005). *PolyMUMPs Design Handbook: MEMPs Process*. MEMSCAP.
- Chen, Y. M., Sheppy, M., Yen, T. T., Vigevani, G., Lin, G. M., Kuypers, J., . . . Pisano, A. P. (2009). Bi-chevron aluminum nitride actuators for high pressure microvalves. *Proceedings of the Eurosensors XXIII conference* (págs. 706-709). Elsevier.
- Chiorean, R. S., Dulescu, M. C., M. P., & M. H. (2014). Analytical and numerical study on the maximum force developed by a V-beam thermal actuator. *The 7th International*

- conference *Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013)* (págs. 359-363). Elsevier.
- Chu, J., Zhang, R., & Chen, Z. (2011). A novel SU-8 electrothermal microgripper based on the type synthesis of the kinematic chain method and the stiffness matrix method. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(5), 1-15.
- Craig, A. (2010). *MEMS EARTHWORM: THE DESIGN AND TESTING OF A BIO-INSPIRED HIGH PRECISION, HIGH SPEED, LONG RANGE PERISTALTIC MICRO-MOTOR*. Halifax, Nova Scotia: Dalhousie University.
- Daunton, R., Gallant, A., Wood, D., & Katakya, R. (2011). A thermally actuated microgripper as an electrochemical sensor with the ability to manipulate single cells. *Chem. Commun.*, 47, 6446-6448.
- E. R., A. K., & Foulds, I. G. (2012). Characterization of Kink Actuators as Compared to Traditional Chevron Shaped Bent-Beam Electrothermal Actuators. *micromachines*, 3, 542-549.
- Enikov, E. T., Kedar, S. S., & Lazarov, K. V. (2005). Analytical model for analysis and design of V-shaped thermal microactuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(4), 788-798.
- Espinosa, H. D., Y. Z., & N. M. (2007). Design and Operation of a MEMS-Based Material Testing System for Nanomechanical Characterization. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, 16(5), 1219-1231.
- Feng, Y.-Y., Chen, S.-J., & Hsieh, P.-H. (2016). Fabrication of an electro-thermal micro gripper using silver-nickel ink. *2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (págs. 1141-1145). Shangai, China: IEEE Xplore.
- Ferreira, A. (2009). *Matlab Codes For Finite Element Analysis*. Springer.
- ferroc ceramic. (s.f.). http://www.ferroc ceramic.com/silicon_nitride.htm.
- Fu, Y., & Du, H. (2003). Fabrication of micromachined TiNi based microgripper with. *Smart Sensors, Actuators, and MEMS*,. 5116, págs. 38-48. Maspalomas, Gran Canaria: SPIE. doi:<https://doi.org/10.1117/12.498184>
- Girbau, D., Lazaro, A., & Pradell, A. (2003). RF MEMS switches based on the buckle-beam thermal actuator. *33rd European Microwave Conference Proceedings (IEEE Cat. No.03EX723C)* (págs. 651-655). Munich, Germany, Germany: IEEE Xplore.
- Guan, C., & Zhu, Y. (2010). An electrothermal microactuator with Z-shaped beams. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*(20), 1-9.

- Ho Kwan, A. M., S. S., & X. L. (2011). Designs for improving the performance of an electro-thermal in-plane actuator. *2011 IEEE/IFIP 19th International Conference on VLSI and System-on-Chip* (págs. 220-225). Hong Kong, China: IEEE Xplore.
- Huang, H. W., & Yang, Y. J. (2012). Characterization of an 2x2 SCB Optical Switch Integrated with VOA. *International Journal of Automation and Smart Technolog*, 2(2), 121-132.
- Hussein, H., Tahhan, A., Moal, P. L., Bourbon, G., Haddab, Y., & Lutz, P. (2015). Dynamic electro-thermo-mechanical modeling of a U-shaped electrothermal actuator. *Micromech. Microeng.*, 1-11.
- Iamoni, S., & Soma, A. (2014). *Design of an electro-thermally actuated cell microgripper*. Berlin Heidelberg: Springer.
- J. K. (2013). *Design, fabrication, and characterization of electro-thermal micro devices based on MEMS actuators*. Rochester, Michigan: ProQuest.
- Jain, N., Sharma, A., & Kumar, S. (2013). Design and Simulation of Bidirectional In-Plane Chevron Beam Microtweezer. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, 43-50.
- Jia, Y., & Xu, Q. (2013). Design of a Monolithic Dual Axis Electrostatic Actuation MEMS Microgripper with Capacitive Position/Force Sensors. *IEEE International Conference on Nanotechnology* (págs. 817-820). Beijing: IEEE.
- Jia, Y., Jia, M., & Xu, Q. (2014). A Dual-Axis Electrostatically Driven MEMS Microgripper. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(187), 1-9.
- Jithendra Prasad, M., & Shameem, S. (2016). Design and analysis of Micro-]Cantilever based biosensor for swine flu detection. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 6(3), 1190-1196. doi:10.11591/ijece.v6i3.9446
- Kaajakari. (2009). *Practical MEMS*. Small Gear Publishing.
- Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS*. Las Vegas, NV: Small Gear Publishing.
- Kim, K., Liu, X., Zhang, Y., & Sun, Y. (2008). Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic MEMS microgripper with two-axis force feedback. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 18, 1-8.
- Lobontiu, N., & Garcia, E. (2005). *Mechanics of microelectromechanical*. US: Springer Science.
- Long, Q., Jae-Sung, P., & Yogesh, B. G. (2001). Bent-Beam electrothermal actuators part I: Single beam and cascaded devices. *Journal of Microelectromechanical Systems*.
- Luo et al. (2005). Three types of planar structure microspring electro-thermal actuators with insulating beam constraints. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 1527-1535.

- Luo, J. K., Flewitt, A. J., Spearing, S. M., & Fleck, N. A. (2005). Three types of planar structure microspring electro-thermal actuators with insulating beam constraints. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 15, 1527-1535.
- Luque, A., & Nihtanov, S. (2018). *Smart Sensors and MEMS*. Elsevier.
- Mackay, R. E., & Le, H. (2008). Development of Micro-Tweezers for Tissue Micro-Manipulation. *2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (págs. 1551-1555). Shangai China: IEEE Xplore.
- Maloney, J. M., Devoe, D. L., & Schreiber, D. S. (2000). ANALYSIS AND DESIGN OF ELECTROTHERMAL ACTUATORS FABRICATED FROM SINGLE CRYSTAL SILICON. *ASME*, 1-8.
- MEMS. (1999). Obtenido de <http://mems.engr.wisc.edu/MEMS.html>.1999
- Mulstein, C. L., & Ritchie, R. O. (2003). High-cycle fatigue of micron-scale polycrystalline silicon films:. *International Journal of Fracture*, 119/120, 449-474.
- Park, D. S.-W., Kumar, A. N., Cha, D., Lee, G.-S., J., M. K., Skidmore, G., . . . Lee, J.-S. (2010). A sub-micron metallic electrothermal gripper. *Microsyst Technol*, 367-373.
- Pelesko A. , J., & Berstein H., D. (2003). *Modeling MEMS and NEMS*. New York: Chapman & Hall / CRC.
- Phinney, L. M., Baker, M. S., & J. R. (2012). *Thermal Microactuators*. USA: INTECH.
- S. P., Holmes, A. S., Robertson, I. D., & S. L. (2006). Single-Pole Eight-Throw RF MEMS Rotary Switch. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, 1-10.
- S.-H. T., D. S., & M. P. (2006). Out-of-plane electrothermal actuators in silicon-on-insulator technology. *Can. J. Elect. Comput.*, 31(2), 97-104.
- Santana, A., & Verdezoto, G. (2011). Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. *tesis*, 172.
- Sassen, W. P., Henneken, V. A., Tichem, M., & Sarro, P. M. (2008). An improved in-plane thermal folded V-beam actuator for optical fibre alignment. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*(18), 1-9.
- Shi, H., Shi, W., Zhang, R., Zhai, J., Chu, J., & Dong, S. (2017). A micromachined piezoelectric microgripper for manipulation of micro/nanomaterials. *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, 88, 1-7.
- Shivhare, P., Uma, G., & M. Umapathy. (2015). Design enhancement of a chevron electrothermally actuated. *Microsyst Technol*, 1-9.

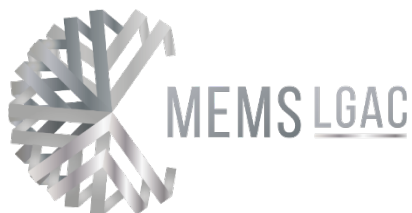
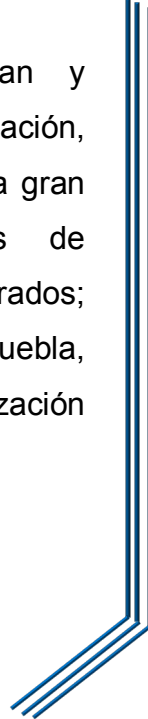
- Sinclair, M. (2010). A high force low area MEMS thermal actuator. *ITHERM 2000. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No.00CH37069)* (págs. 1089-9870). Las Vegas, NV, USA, USA: IEEE Xplore.
- Suryansh, A., Sumati, Arti, A., & P.J., G. (2012). Design Of Mems Based Microcantilever Using Comsol Multiphysics. *International Journal of Applied Engineering Research*, 3.
- Szabo, F. R. (2004). *DEMONSTRATING OPTOTHERMAL ACTUATORS FOR AN AUTONOMOUS MEMS MICROROBOT*. Ohio: United States Department of Defense.
- Tsai, Y.-C., Lei, S. H., & Sudin, H. (2005). Design and analysis of planar compliant microgripper based on kinematic approach. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 15(143), 143-156.
- Turner, M., Clough, R., Martin, H., & Topp, L. (1956). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 805-854.
- V. S., S. B., & S. B. (2002). Fabrication and investigation of in-plane compliant SU8 structures for MEMS and their application to micro valves and micro grippers. *Sensors and Actuators*, 457-461.
- Varona, J., Tecpoyotl-Torres, M., & Hamoui, A. (2007). Modeling of MEMS Thermal Actuation with External Heat Source. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2007)*. Morelos, Mexico: IEEE Xplore.
- Velosa-Moncada, L., Aguilera-Cortés, L. A., González-Palacios, M., Raskin, J.-P., & Herrera-May, A. L. (2018). Design of a Novel MEMS Microgripper with Rotatory Electrostatic Comb-Drive Actuators for Biomedical Applications. *Sensors*, 1-22.
- Ville, K. (2009). *Practical MEMS*. Small Gear Publishing .
- Wang, Y., Z. L., McCormick, D. T., & Norman, T. C. (2003). A micromachined RF microrelay with electrothermal actuation. *Elsevier*, 231-236.
- Won, D. S., Nallani, A. K., D. C., G.-S. L., Kim, M. J., G. S., & J.-B. L. (2010). A sub-micron metallic electrothermal gripper. *Microsyst. Technol.*, 367-373.
- Yang, & Qingsong, X. (2017). A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers. *J Micro-Bio Rob*, 1-14.



ANEXO A

PROCESOS DE FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS MEM

En este anexo, se presentan y describen dos procesos de fabricación, que en el estado del arte y en la gran mayoría de los laboratorios de fabricación de MEMS son considerados; PolyMEMS-INAOE (Puebla, Puebla, México) y PolyMUMPS (estandarización internacional).



Anexo A: Procesos de fabricación de dispositivos MEM

A.1. Fabricación del circuito integrado PolyMEMS-INAOE

En éste capítulo, se presenta el proceso de fabricación del chip PolyMEMS VII empleando el proceso PolyMEMS-INAOE, una descripción general del proceso de fabricación de los circuitos desarrollados en el INAOE.

El chip se construye sobre un sustrato de silicio cristalino con una dirección cristalográfica de (1 0 0); para este trabajo el dopado del sustrato no es relevante, puesto que la fabricación es de tipo superficial, se empleará un conjunto de tres niveles de mascarillas. La mascarilla 1 se utiliza para definir la base de anclaje de las estructuras. La mascarilla 2 se emplea para definir las estructuras de prueba; y por último la mascarilla 3 se utiliza para definir el área de protección de las estructuras durante la definición de las cavidades.

Se revisó y optimizó el módulo de fabricación de grabado por RIE (Reactive Ion Etching) de las estructuras en el Poly-si. Así mismo, se propone un módulo de micro maquinado de volumen en seco por ICP-RIE.

A continuación, se describe el proceso de fabricación completo de forma simplificada. En las secciones posteriores del capítulo se presenta las consideraciones y modificaciones que se deben tener en cuenta para asegurar una fabricación exitosa.

A.2. Descripción simplificada del proceso de fabricación del chip PolyMEMS VII.

El proceso de fabricación completo se describe por etapas como se puede observar a continuación (Calleja Arriaga, Linares Aranda, Torres Jácome, & Báez Álvarez, 2017):

→ Sección (a), comenzamos con la deposición de las películas sobre el sustrato de Silicio.

1. La fabricación comienza con el desengrasado y las limpiezas RCA estándar al o los sustratos.
2. Crecimiento de óxido de silicio SiO_2 , $\sim 3000\text{\AA}$, a una temperatura de 1100°C .
3. Depósito de Poly no dopado de $0.5\mu\text{m}$ de espesor por LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) a 650°C .
4. Depósito de una película de PSG (phosphosilicate glass) de $2.5\mu\text{m}$ de espesor, por APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition) a 450°C .

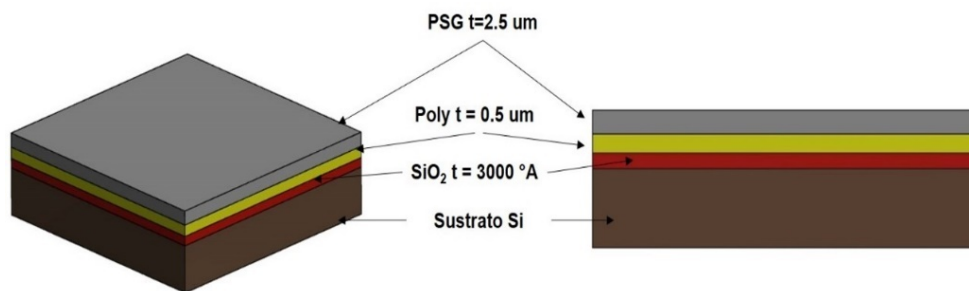


FIGURA A.1 DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA SECCIÓN A, DEPOSICIONES DE LAS PELÍCULAS DE PSG, POLY Y DIÓXIDO DE SILICIO.

→ Sección (b), grabado para la deposición de las anclas para el fijado del dispositivo.

5. Grabado seco por RIE con CF_4 , (Tetrafluorometano) del PSG para definir el anclaje de las estructuras. Se utiliza la primera mascarilla del chip, para definir las ventanas de anclaje.

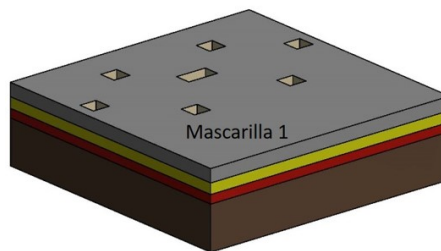


Figura A.2 Definición del grabado para las anclas que mantendrán fijo al dispositivo

→ Sección (c), Definición de la estructura.

6. Depósito de Poly por LPCVD a 650 °C. Se depositan tres espesores diferentes, 1 μm , 2 μm y 3 μm .

7. Se realiza un dopado n+ de las películas de Poly con fósforo a 1000 °C.

8. Se lleva a cabo la definición de estructuras mediante grabado seco en RIE, utilizando SF_6 (Sulfuro hexafluoride) y O_2 en proporción de 1.5:1. Enseguida se utiliza la segunda mascarilla del chip.

9. Posteriormente se efectúa el tratamiento térmico para disminuir los EMR del Poly, a 1000 °C.

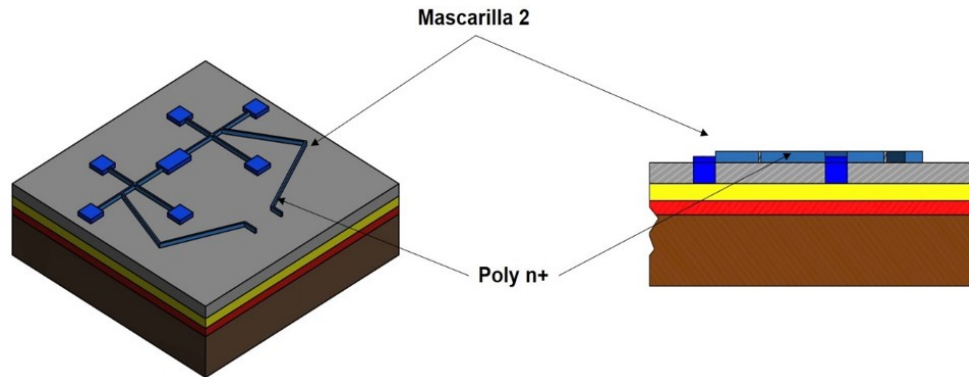


Figura A.3 Definición del dispositivo completo y uso de la segunda mascarilla

→ Sección (d), activación y metalización del dispositivo.

10. Depósito de una película de PSG de 3 μm de espesor por APCVD a 450 °C.

11. Depósito de una película de Aluminio de 1000 Å de espesor, por evaporación.

12. Grabado húmedo del aluminio por Al-Etch. Se utiliza la mascarilla tres para definir la protección de las estructuras y el área activa a micromaquinar.

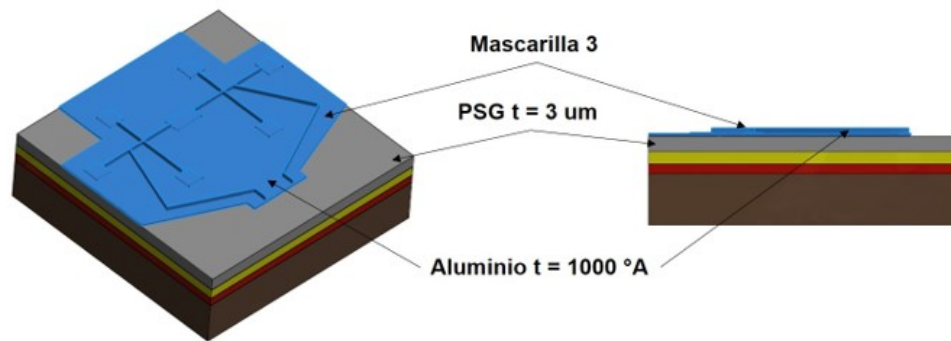


Figura A.4 Aplicación del recubrimiento metálico, aluminio, en el dispositivo.

→ Sección (e), grabado en RIE

13. Grabado del PSG de 3 μm , utilizando CF_4 , para completar la protección de las estructuras.

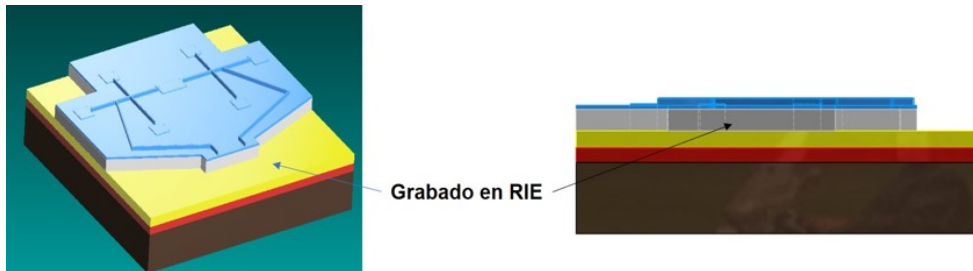


Figura A.5 Aplicación completa de la protección por metalización de aluminio.

→ Sección (f), definición de cavidades y creación de dados.

14. Se definen cavidades de 40 μm de profundidad, mediante grabado seco isotrópico en RIE, utilizando SF_6 y O_2 en proporción de 5:1. El micro maquinado de las cavidades se realiza con la profundidad especificada, particularmente el óxido de soporte de los voladizos no se graba completamente.

15. En este punto las obleas son cortadas en dados con dimensiones de 6000 $\mu\text{m}^2 \times 6000 \mu\text{m}^2$; utilizando la cortadora de disco.

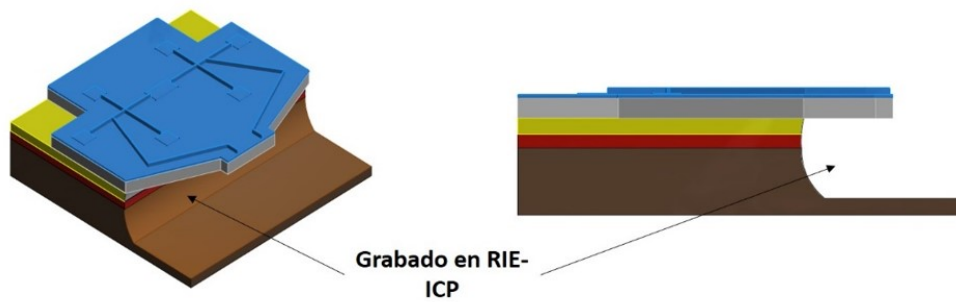


Figura A.6 Creación de las cavidades por RIE y generación de los dados

→ Sección (g), liberación de estructura

16. Se continúa con el paso 13 para terminar de grabar la cavidad, y liberar parcialmente las estructuras.

17. Por último se realiza el proceso final de liberación húmeda para eliminar el material de protección (Aluminio y PSG). Todo el proceso es realizado con las muestras sumergidas, subsecuentemente en las soluciones grabantes (Al-Etch y HF al 49 %), hasta el secado en un horno de convección a 120 °C.

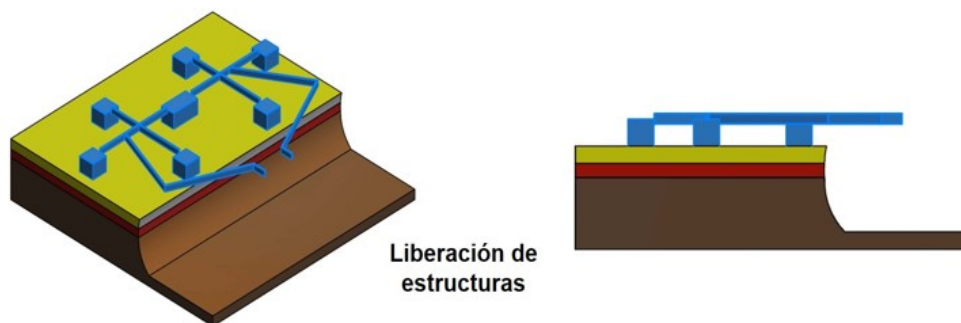


Figura A.7 Liberación del dispositivo

A continuación se listan los pasos para el procedimiento de liberación mecánica.

- Grabado del Aluminio en solución Al-Etch por 1min 30 s a 60 °C.
- Enjuague en Agua-DI por 3 min a 60 °C.
- Grabado de PSG en ácido HF al 49 % por 15min.
- Ciclos de enjuagues: Isopropanol => Agua-DI => Isopropanol => Agua-DI => Isopropanol; a 60 °C por 3 min cada uno.

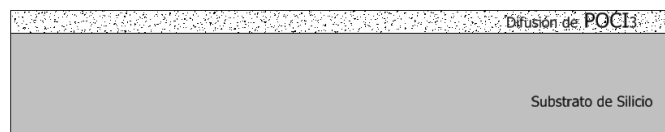
→ Secar en el horno de convección a 120 °C hasta la evaporación completa de residuos.

A.3. Características del proceso de fabricación PolyMUMPS

El proceso utilizado para la fabricación es conocido como MUMPS (Multi-User MEMS Process), este programa comercial provee una opción viable para la fabricación de MEMS a las universidades, la industria y el gobierno. MUMPS se encuentra dividido en 3 procesos diferentes: PolyMUMPS, MetalMUMPS y SOIMUMPS. PolyMUMPS es un proceso de micro-maquinado superficial de tres capas de polisilicio, el cual se apega a un estándar que le permite ser lo más genérico posible y así servir de base para muchos diseños distintos en una sola oblea de silicio, buscando que los grosores de las capas estructurales y de sacrificio sean aceptables para la mayoría de los usuarios, así como las reglas del diseño de layout. MetalMUMPS utiliza como material principal el recubrimiento de níquel y a diferencia de los otros dos procesos, tiene una dimensión mínima característica de 5 μm ; se utiliza en la fabricación de interruptores, relevadores y dispositivos RF. SOIMUMPS parte de una oblea de silicio sobre un aislante, se utiliza en aplicaciones ópticas, electrotérmicas electromecánicas, etc. (Carter, y otros, 2005).

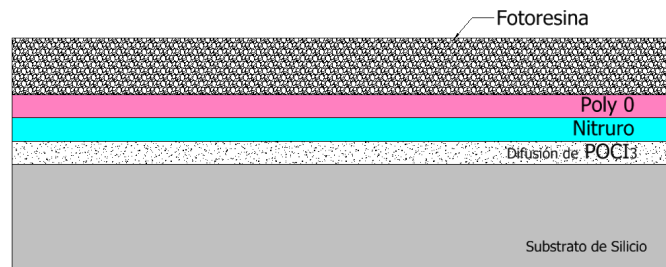
El proceso PolyMUMPS comienza con obleas de 150 mm de silicio tipo-n. La superficie de las obleas es fuertemente dopada con fósforo en un horno de difusión estándar utilizando una capa de sacrificio de vidrio de fosfosilicato (PSG) como fuente del dopaje.

→ Esto minimiza las cargas sobre la superficie de la oblea

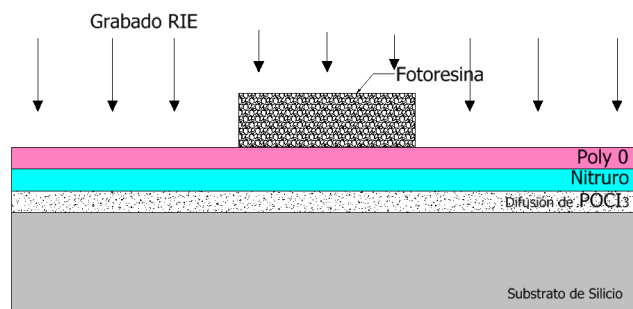


Se elimina la capa de PSG y se deposita una capa de 600 nm de nitruro de silicio como aislante eléctrico, seguido de otra capa de 500 nm de poli-silicio, esta capa se llama Poly 0 y se le da forma con un proceso llamado fotolitografía, proceso en el cual se cubre la oblea con una sustancia llamada fotoresina que al ser revelada con la máscara adecuada se obtiene la máscara deseada para hacer el grabado en el Poly 0 utilizando el sistema de grabado de plasma.

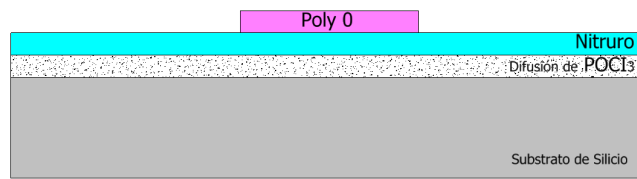
Se depositan a bajas tensiones una capa de nitruro y posteriormente Poly0. En seguida se deposita una resina foto sensible UV sobre la oblea para que exista una deposición uniforme.



La fotoprotección se expone utilizando el primer nivel de máscara (POLY 0) y se imprime la imagen. El polisilicio expuesto se elimina luego mediante un grabado por RIE, transfiriendo el patrón POLY0 a la oblea.



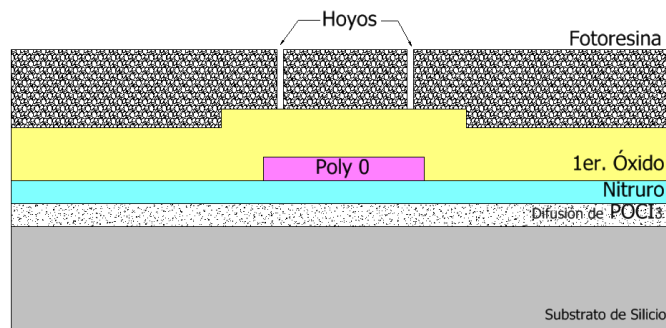
Mediante un solvente se retira la fotoresina.



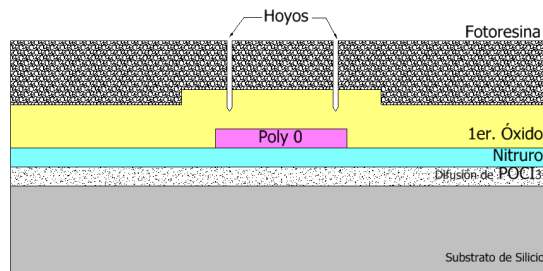
Ahora una capa de sacrificio de PSG de 2 μm se deposita y se hornea a una temperatura de 1050 $^{\circ}\text{C}$ por una hora en argón. Esta capa de PSG se llama Primer Óxido y va a ser eliminada al final del proceso para liberar la primera capa mecánica de poli-silicio. Una vez que se tiene la capa del Primer Óxido colocada, es necesario someterla a un proceso de litografía para crear las protuberancias llamadas Dimples, que tienen como fin el asegurar que se mantengan separadas dos capas y así eliminar un fenómeno denominado stiction, el cual consiste en la atracción de los conductores lo cual podría producir un corto al tocar una con otra, la profundidad nominal para los Dimples es de 750 nm.

La primera capa de óxido (2 μm) es depositada sobre la oblea a bajas temperaturas por CVD.

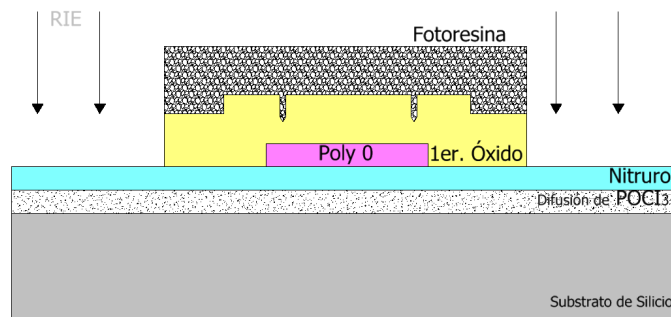
La oblea recubierta por la fotoresina se expone y se genera un segundo nivel de máscara (hoyos).



Los hoyos son grabados en el primer óxido por una combinación de grabado en RIE y BOE (húmedo).

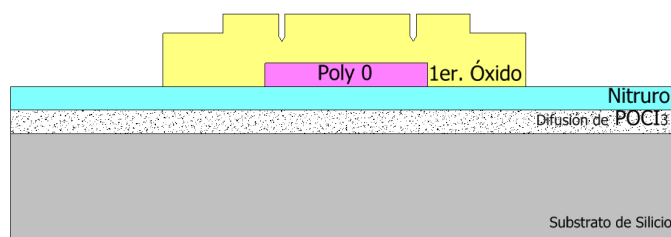


La fotoresina en los hoyuelos es retirada y una nueva capa de fotoresina es aplicada para el tercer nivel de máscara (ancla 1). El primer óxido se graba y por medio del proceso RIE se retira el óxido del área de anclas.



La fotoresina es retirada por medio de un baño de solventes, de tal manera que la oblea se encuentra lista para procesar el poly 1.

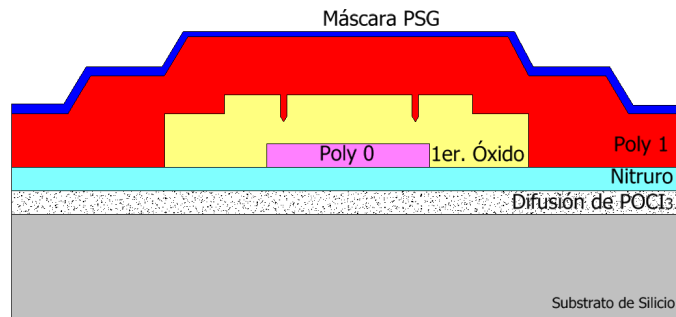
Ancla 1 define donde se unirá el poly 1 con el substrato, el espesor del primer óxido define que tan alto (ya sea nitruro o poly 0) se colocará del poly 1 después de la liberación.



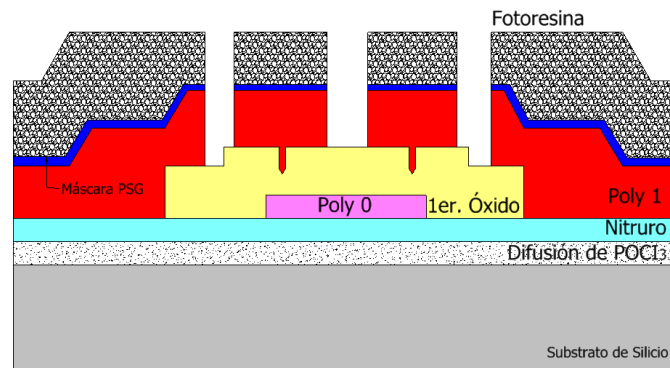
Ahora es necesario someter la oblea a un grabado RIE y así hacer la preparación para anclar la siguiente capa de poli-silicio, Poly 1, al nitruro. En los puntos de ancla, se deposita la capa del Poly 1 con un grosor de 2 μm seguido de una capa de 200 nm de PSG y nuevamente se hornea la oblea

1050 °C por una hora, el horneado dopa al polisilicio con el fósforo de las capas de PSG que se encuentran arriba y abajo, esto sirve también para reducir significativamente el estrés en el Poly 1. Esta última capa, junto con su PSG de máscara respectiva, es sometida a un proceso de litografía utilizando una máscara diseñada para formar la primera capa estructural Poly 1. La capa de PSG es grabada para producir una máscara que servirá en el próximo grabado de poli-silicio, esta máscara es más resistente a la química empleada para el grabado del polisilicio que la fotoresina y asegura mejor transferencia del patrón al poli-silicio. Después de grabar el poli-silicio, la fotoresina es eliminada y los residuos de la máscara se eliminan por medio de del grabado RIE (Carter, y otros, 2005).

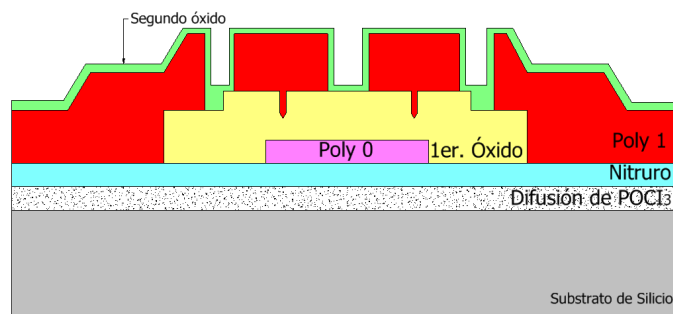
Después de limpiar la oblea, la película poly 1 es positada por LPCVD. Una película delgada de PSG es depositada sobre la película de poly 1 y la oblea es sometida a un recocido a altas temperaturas con la finalidad de reducir los esfuerzos residuales y lograr el dopado del poly 1.



La oblea es recubierta con fotoresina y la cuarta película (Poly 1) es modelada. La oblea es grabada con RIE hasta el primer óxido haciendo uso del PSG y la película Poly 1.

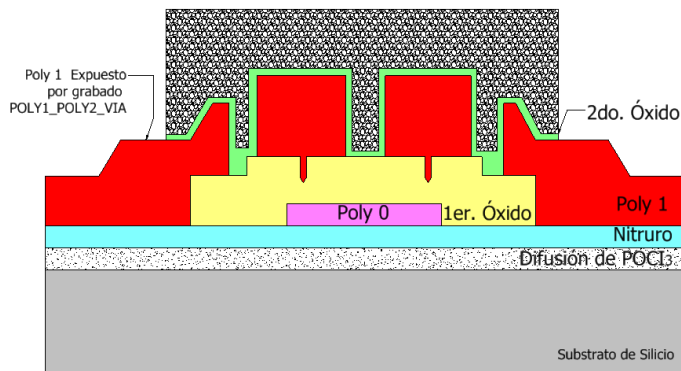


La segunda capa de óxido ($0.75 \mu\text{m}$) se deposita mediante CVD a baja temperatura, cubriendo de manera uniforme y cuidando la topografía de la oblea y definiendo las separaciones correspondientes a las películas de polisilicio.



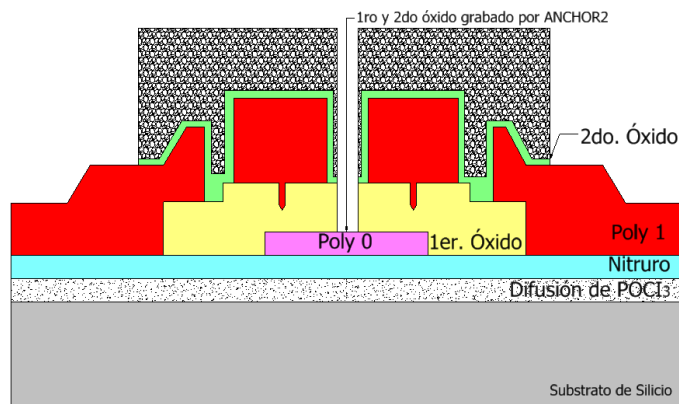
Una vez que el Poly 1 ha sido grabado, se deposita y hornea una segunda capa de sacrificio de PSG con un grosor de 750 nm , conocida como Segundo Óxido, la cual recibe un patrón utilizando dos máscaras distintas de grabado con fines distintos. La primera genera el nivel llamado POLY1_POLY2_VIA genera unos hoyos en el Segundo Óxido hasta la capa del Poly 1, para hacer una conexión entre las capas Poly 1 y Poly 2, esta máscara obtiene su patrón litográficamente y es grabada por RIE.

La oblea es recubierta con fotorresina y la quinta máscara (POLY1_POLY2_VIA) es estampada y grabada en RIE. Esto define las regiones de contacto entre poly 1 y poly 2.



La segunda máscara genera el nivel llamado Anchor 2 que atraviesa el Primer y Segundo Óxido en un solo paso y así eliminar errores debido a una mala alineación entre los hoyos grabados por separado, más importante que eso, elimina la necesidad de hacer una incisión en el Primer Óxido no relacionada con anclar una estructura del Poly 1, lo cual expondría innecesariamente el substrato a los pasos posteriores del proceso que pueden causar daño al Poly 0 o al Nitruro, el proceso para hacer el Anchor 2 es igual al del POLY1_POLY2_VIA.

La fotoresina se retira y la oblea se recubre. La sexta máscara (ANCHOR2) se modela para posteriormente grabar el primer y segundo óxido en un solo paso. Esto define la región donde el poly2 hará contacto con el substrato (ya sea Nitruro o poly0).

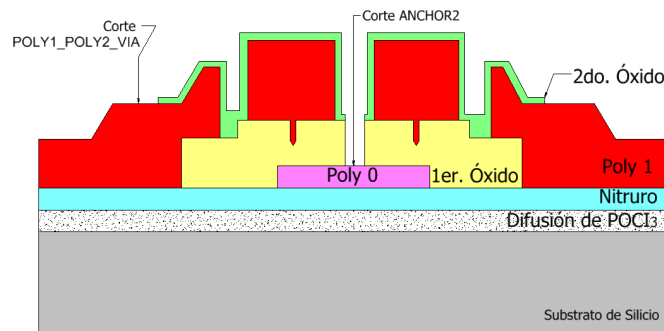


En el proceso sigue depositar una segunda capa estructural con un grosor de 1.5 μm , Poly 2, seguida de 200 nm de PSG. Así como sucedió con Poly1, el

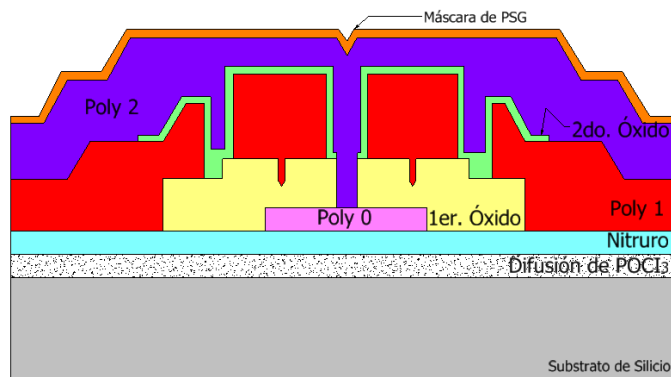
PSG actúa como una máscara y fuente de dopaje para el Poly 2. Una vez más la oblea es horneada a 1050 °C para dopar el polisilicio y reducir el estrés el Poly 2 se somete a un proceso litográfico con la séptima máscara.

Las capas PSG y de polisilicio son grabadas con proceso de plasma y RIE, después la fotoresina y el óxido de enmascaramiento se eliminan para finalmente depositar una capa de 0.5 µm de metal que provee de enrutamiento eléctrico y superficies de espejo altamente reflejantes. La oblea es grabada litográficamente con la octava máscara y el metal es depositado y acomodado.

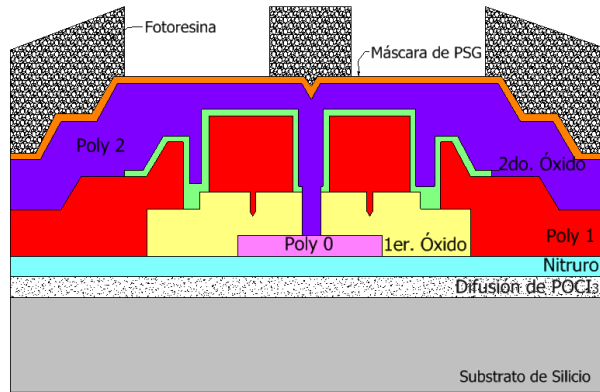
La fotoresina es removida y la oblea está lista para la deposición del poly2.



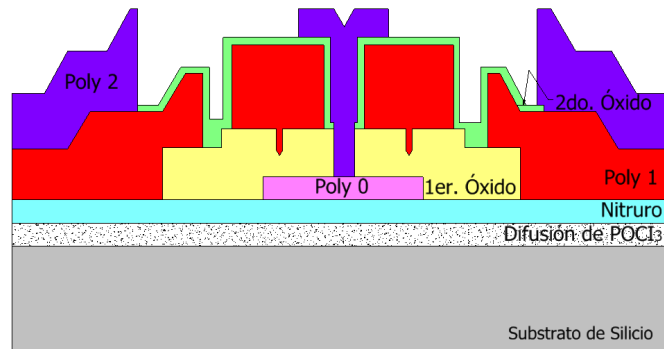
La segunda película de polisilicio es depositada seguida por una capa de PSG. Este se somete a un recocido para reducir el esfuerzo en poly 2 y al mismo tiempo poder realizar su pasivación. Debido a que la deposición por CVD es uniforme, todos los hoyos serán rellenos a diferentes grados con poly 2.



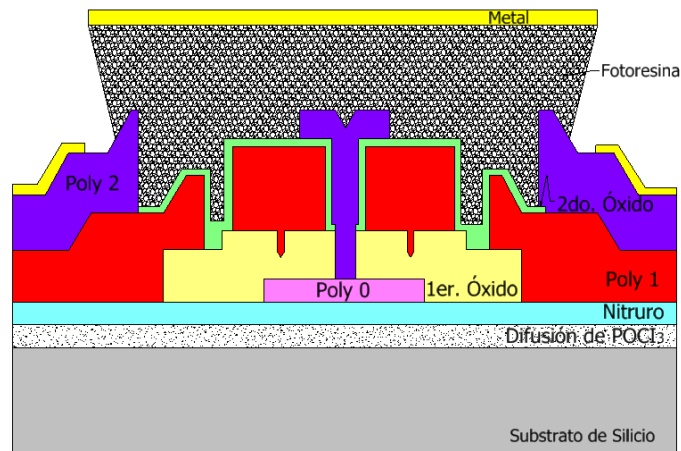
La oblea es recubierta con fotoresina y la séptima máscara es grabada (Poly 2). Tanto la fotoresina como la película delgada de PSG se grabará la máscara por medio de RIE.



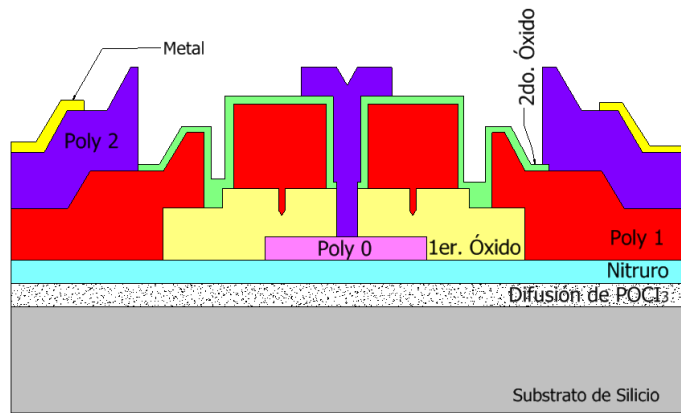
Después la película poly 2 es grabada y la oblea es limpiada, posteriormente se libera la estructura mecánica básica.



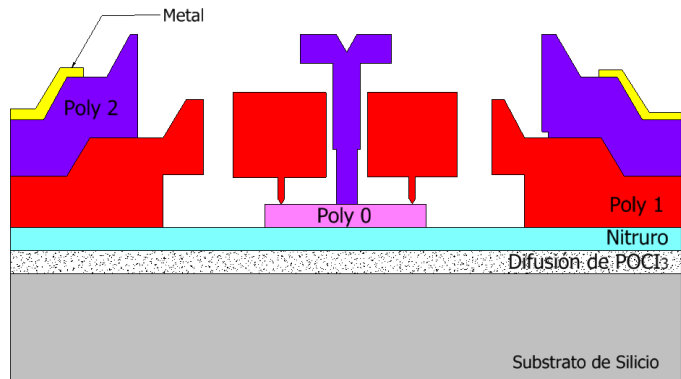
Se utiliza una siguiente plantilla para depositar la película metálica sobre la oblea. La fotoresina es grabada utilizando la octava y novena mascarilla y el metal se deposita adhiriéndolo en el poly 2 donde se expuso.



La fotoresina y el remanente metálico son removidos enjuagándolo con solvente. La estructura ahora está completa y lista para ser liberada.



Por medio de un baño de 2 minutos en HF concentrado, se elimina todas las capas de óxido de sacrificio y se liberan las partes mecánicas móviles.



Se retiran las capas protectoras de fotoprotección por medio de un baño de disolventes. En seguida se sumergen los chips en un baño de HF al 49% a temperatura ambiente durante 2,5 minutos para liberar las estructuras.

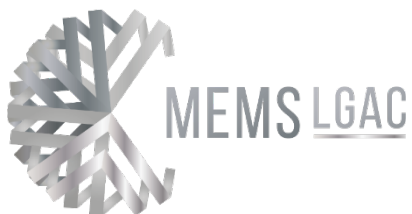

Por último la oblea es cortada y enviada al usuario para la eliminación de las capas de sacrificio y pruebas, las capas de sacrificio se eliminan al sumergir el chip en un baño de 49 % HF a temperatura ambiente por 2 minutos, seguido de varios minutos en agua DI y después en alcohol para reducir stiction seguido de por lo menos 10 minutos en un horno a 110 °C.



ANEXO B

Publicaciones

En este Anexo, se presentan los artículos, memorias en congreso y capítulos en libro, derivados de este trabajo.



Anexo B. Publicaciones

B.1. ARTÍCULOS EN REVISTAS INDIZADAS

1. Dynamic Analysis of a Microgripper and its components
M. Tecpoyotl-Torres*, P. Vargas-Chable, S. Robles-Casolco and R. Cabello-Ruiz
British Journal of Applied Science & Technology, 9(4): 360-373, 2015, Article no.BJAST.2015.276
ISSN: 2231-0843
SCIEDOMAIN international. Indexing: PROQUEST, EBSCO
www.sciencedomain.org
https://www.researchgate.net/publication/277978505_Dynamic_Analysis_of_a_Microgripper_and_Its_Components
2. Diseño y simulación de un acelerómetro con respuesta de sensibilidad mejorada.
Margarita Tecpoyotl-Torres, Ramón Cabello-Ruiz, Pedro Vargas-Chablé, Said Robles-Casolco y José Gerardo Vera-Dimas.
Revista Ingeniería y Competitividad, Vol. 18, No. 2, Pp. 141-150 (2016). ISSN 0123-3033
ISSN ELECTRONICO 2027-8284. Colombia.
Indexación: SciELO Colon, Redalyc, EBSCO Open Journal Systems.
Web of Science
COLOMBIA
<http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v18n2/v18n2a13.pdf>
FECHA DE PUBLICACIÓN 8 DE JULIO DE 2016
3. A Novel Displacement-amplifying Compliant Mechanism Implemented on a Modified Capacitive Accelerometer
Ramon Cabello-Ruiz, Margarita Tecpoyotl-Torres, Alfonso Torres-Jacome, Volodymyr Grimalsky, Jose Gerardo Vera-Dimas, Pedro Vargas-Chable
International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)
Vol. 7, No. 4, August 2017, pp. 1858-1866
ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v7i4.pp1858-1866
INDEXED IN SCOPUS. OPEN ACCEsS.
MALASIA
4. Displacement Mechanical Amplifiers Designed on Poly-Silicon
Ramon Cabello-Ruiz*, Margarita Tecpoyotl-Torres*, Alfonso Torres Jácome**, Gerardo Vera-Dimas*, Svetlana Koshevaya*, Pedro Vargas-Chable*International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).
Vol. 9, No. 2, April 2019, pp. 894~901
ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v9i2.pp.894-901.
<https://www.iaescore.com/journals/index.php/IJECE/article/view/13423/10427>

B.2. Artículos aceptados

1. Pedro Vargas-Chable, Margarita Tecpoyotl-Torres*, Ramon Cabello-Ruiz, Alfonso Aldair Colin-Antunez, Rafael Vargas-Bernal. Novel Capacitive Accelerometers with Beams based on

B.3. Capítulo en Libro Aceptado

1. “Dynamic Analysis of a Microgripper based on a Chevron actuator” has been selected to be published as one of the book chapters for the book: Advances in Applied Science and Technology Ed. 1. 2019. Science Domain. Authors: Tecpoyotl-Torres, P. Vargas-Chable, A. Ocampo-Díaz, and R. Cabello-Ruiz.

B.4. Publicaciones en Memorias Arbitradas Internacionales

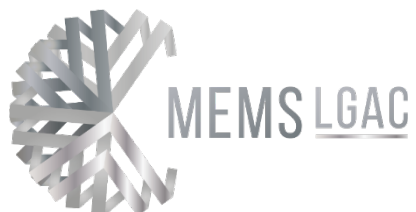
1. Design and simulation of a MEM microgripper based on electrothermal microactuators. Tecpoyotl T. Margarita, Vargas Ch. Pedro, Koshevaya Svetlana, Cabello R. Ramón, Ocampo D. Alejandra and Vera D. J. Gerardo. Thin Films for Solar and Energy Technology VIII, edited by Michael J. Heben, Mowafak M. Al-Jassim, Proc. of SPIE Vol. 9936, 99360I · © 2016 SPIE. Optics + Photonics, San Diego California, USA. Convention Center. 28 August – 1 September 2016. CCC code: 0277-786X/16/\$18 · doi: 10.1117/12.2237533. Pags 1-13.
2. Structural optimization of an electrothermal Chevron V-shape microactuator device P. Vargas-Chable, M. Tecpoyotl-Torres, S. Robles-Casolco and R. Cabello-Ruiz. International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, ICMEAE 2015. Cuernavaca, Mor. ICMEAE 2015. Pp. 262-267. Nov. 24-27 de 2015. 978-1-4673-8329-5/15/\$31.00 ©2015 IEEE DOI: 10.1109/ICMEAE.2015.47 <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7386230&tag=1> <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7386229>
3. Design and FEM analysis of a new and simple electro-thermal actuated microgripper Pedro Vargas Chable, Margarita Tecpoyotl Torres and Ramon Cabello Ruiz 978-1-5386-2532-3/17. Pp. 145-150. 2017 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, ICMEAE 2017. Cuernavaca, Morelos. Nov. 21-24, 2017.



ANEXO C

Reconocimientos

En este Anexo, se presentan los artículos, memorias en congreso y capítulos en libro, derivados de este trabajo.



Anexo C. Reconocimiento

Mejor artículo del 12º Congreso Internacional de Cómputo en Optimización y Software.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

LA SECRETARÍA ACADÉMICA, LA SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN, EL CICAP, A TRAVÉS DE LOS CUERPOS ACADÉMICOS “UAEM-OPTIMIZACIÓN SOFTWARE”, “UEMOR-TECNOLOGÍAS WEB”, Y “UTEZ-REDES CONVERGENTES SEGURAS”

otorga el presente

RECONOCIMIENTO

Pedro Vargas-Chiablé, Margarita Tecpoyotl-Torres, Ramon Cabello-Ruiz, Alfonso Aldair Cofin-Antunez, Rafael Vargas-Bernal Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas – Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IICBA-CIICAp) UAEM, Morelos

Por su participación con la Ponencia:


Novel Capacitive Accelerometers with Beams based on Compliant Crank-Slider Amplifiers


Designada como mejor artículo del Congreso CICOS 2018

En el 12º Congreso Internacional de Cómputo en Optimización y Software - CICos 2018

Cuernavaca, Mor. del 3 al 5 de octubre, 2018

Por una humanidad culta


Dr. Federico Alonso Pecina
Presidente del Congreso

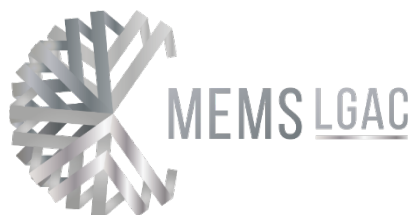

Dr. Marco Antonio Cruz Chávez
Presidente del Comité Técnico



ANEXO D

Solicitud de patente



En este Anexo, se presenta la patente solicitada.



Anexo D. Solicitud de patente

Micropinza basada en el pandeo de trampolines

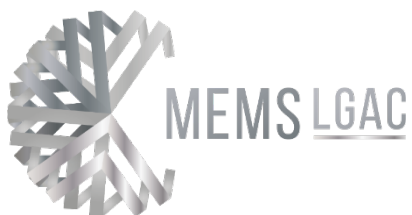

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|----------------------------------|--|---|--|-----------------------|--|---|--|--|---|--|--|---------------------------------|--|---|--|--|--|----------------------------|--|---------------|--|----------------|
|  | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Patente <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál: <input type="checkbox"/> Modelo Industrial <input type="checkbox"/> Objeto Industrial | | Uso exclusivo del IMPI No. de expediente No. de folio de entrada Fecha y hora de presentación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Datos de identificación de los inventores y/o solicitantes generales al registro | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I. El solicitante es el inventor <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1) Nombre (s): Universidad Autónoma del Estado de Morelos 2) Nacionalidad (es): Mexicana 3) Domicilio, calle, número, colonia y código postal: Av. Universidad No. 1001, Col. Chamizos, C.P. 62208, 5ª piso, Torre de Rectoría (Secretaría Académica) Población, Estado y País: Cuernavaca, Morelos, México 4) Teléfono(s) clave(s): 01777 329 7004 5) Fax (clave): 01777 329 7004 Ext. 3212 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| II. DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6) Nombre (s): MARGARITA TEDROYÓTL TORRES; PEDRO URRABAS CHABLE 7) Nacionalidad (es): Mexicana, Mexicana 8) Domicilio, calle, número, colonia y código postal: Av. Universidad No. 1001, Col. Chamizos, C.P. 62208, 5ª piso, Torre de Rectoría (Secretaría Académica) Población, Estado y País: Cuernavaca, Morelos, México 9) Teléfono (clave): 01777 329 7004 10) Fax (clave): 01777 329 7004 Ext. 3212 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| III. DATOS DEL (DE LOS) APODERADO (OS) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11) Nombre (s): Dr. Guadalupe Urteaga Beltrán 12) R. G. P. 00AAJ22134 13) Domicilio, calle, número, colonia y código postal: Av. Universidad No. 1001, Col. Chamizos, C.P. 62208, 5ª piso, Torre de Rectoría (Secretaría Académica) Población, Estado y País: Cuernavaca, Morelos, México 14) Teléfono (clave): 01777 329 7004 15) Fax (clave): 01777 329 7004 Ext. 3212 16) Pertenencia Autorizada para el registro de patentes: Lic. Emma Rivera Arriaga, Lic. Alejandra Ortiz Juárez y Biol. Milvia Rendón Progreso Ramírez | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17) Designación o Título de la invención: "MICROPINZA BASADA EN EL PANDEO DE ARREGLOS DE MICROTRAMPOLINES" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18) Fecha de divulgación previa Día Mes Año | | 19) Clasificación Internacional uso exclusivo del IMPI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20) Divisores de la solicitud | | 21) Fecha de presentación Día Mes Año | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22) Prioridad Reclamada: Número País Figura jurídica Fecha de presentación Día Mes Año No. de serie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lista de verificación (uso interno) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. Hojas <table border="1"> <tr><td> </td><td>Comprobante de pago de la tarifa</td></tr> <tr><td> </td><td>Descripción y reivindicación (es) de la invención</td></tr> <tr><td> </td><td>Dibujo (s) en su caso</td></tr> <tr><td> </td><td>Resumen de la descripción de la invención</td></tr> <tr><td> </td><td>Documento que acredite la personalidad del apoderado</td></tr> </table> | | | Comprobante de pago de la tarifa | | Descripción y reivindicación (es) de la invención | | Dibujo (s) en su caso | | Resumen de la descripción de la invención | | Documento que acredite la personalidad del apoderado | No. Hojas <table border="1"> <tr><td> </td><td>Documento de cesión de derechos</td></tr> <tr><td> </td><td>Constancia de depósito de evidencia biológica</td></tr> <tr><td> </td><td>Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa</td></tr> <tr><td> </td><td>Documento (s) de prioridad</td></tr> <tr><td> </td><td>Transferencia</td></tr> <tr><td> </td><td>TOTAL DE HOJAS</td></tr> </table> | | | Documento de cesión de derechos | | Constancia de depósito de evidencia biológica | | Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa | | Documento (s) de prioridad | | Transferencia | | TOTAL DE HOJAS |
| | Comprobante de pago de la tarifa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Descripción y reivindicación (es) de la invención | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Dibujo (s) en su caso | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Resumen de la descripción de la invención | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Documento que acredite la personalidad del apoderado | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Documento de cesión de derechos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Constancia de depósito de evidencia biológica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Documento (s) de prioridad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Transferencia | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | TOTAL DE HOJAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bajo protesta de decir verdad, certifico que los datos asentados en esta solicitud son ciertos. Dr. Guadalupe Urteaga Beltrán Cuernavaca, Morelos a 27 de noviembre de 2017 Nombre y firma del solicitante o su apoderado Lugar y fecha | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Página 1 de 2 | | IMPI-00-009 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



ANEXO E

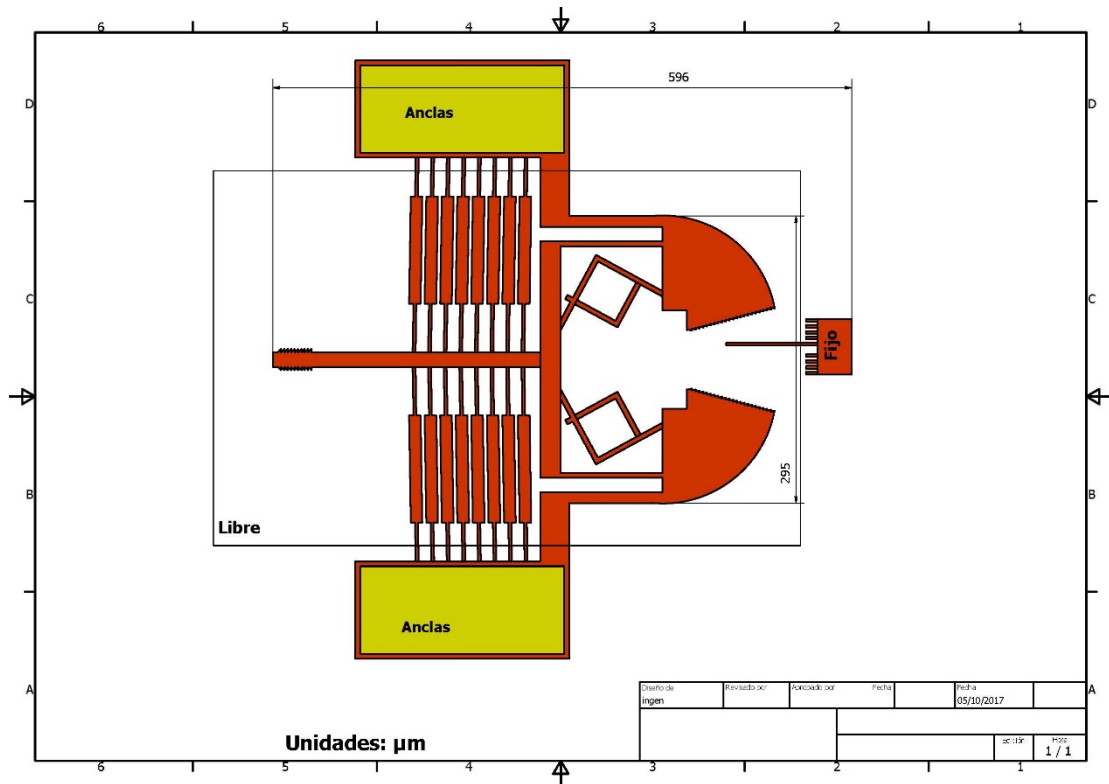
MICRODISPOSITIVOS ADICIONALES

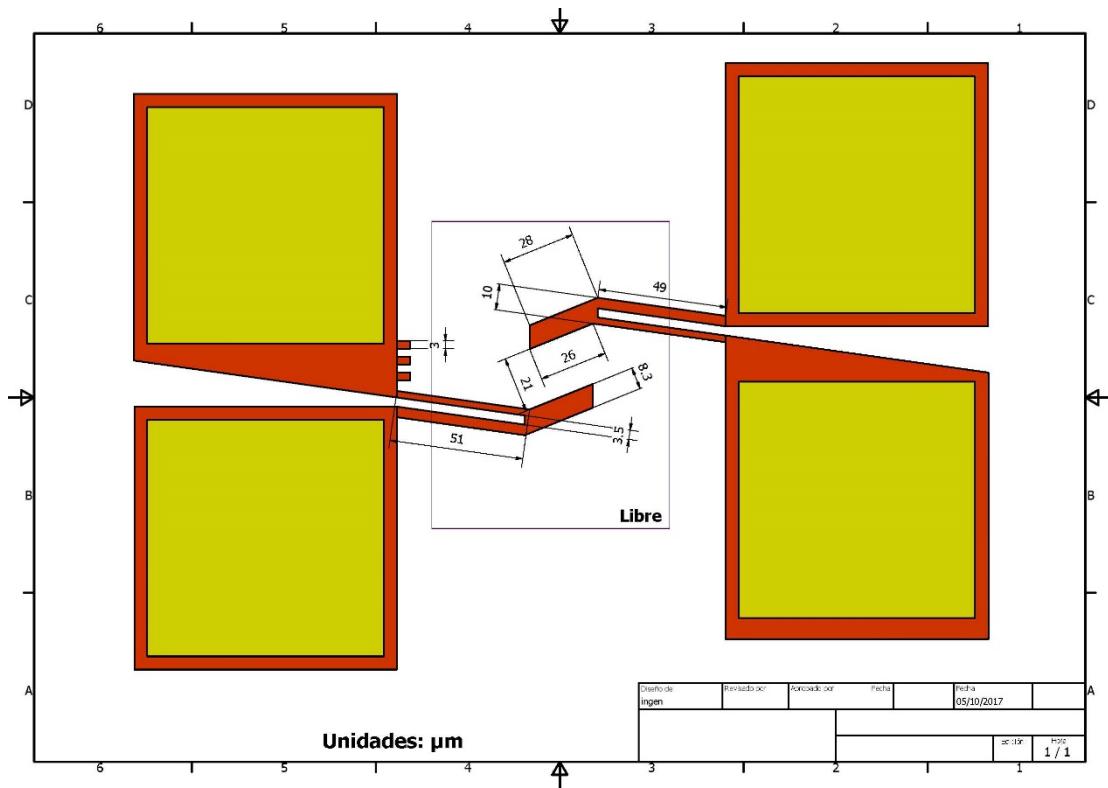
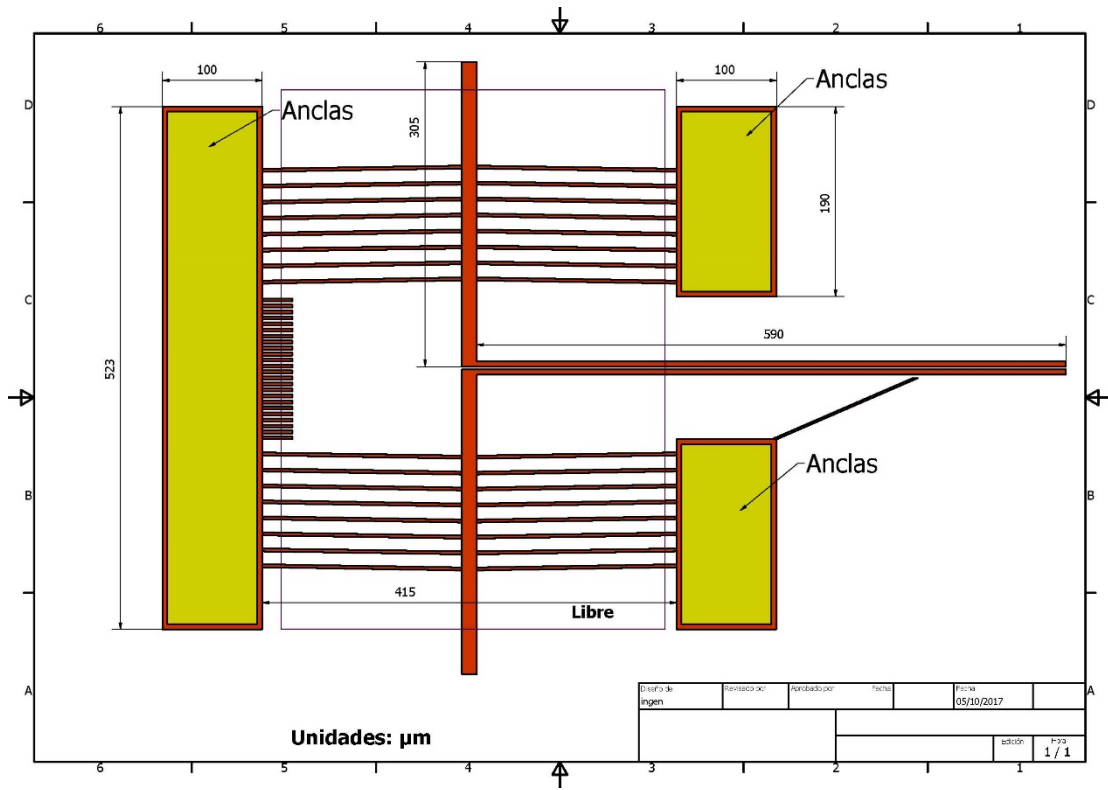
En este Anexo, se presentan los microdispositivos adicionales, diseñados.

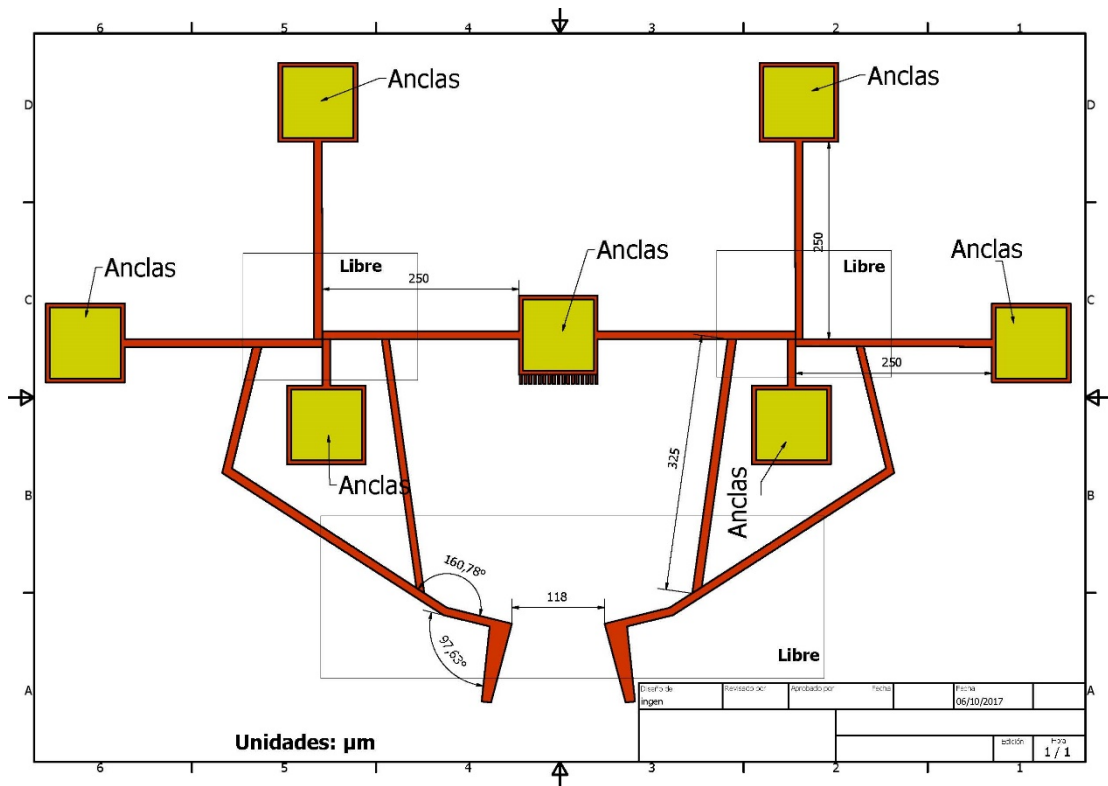
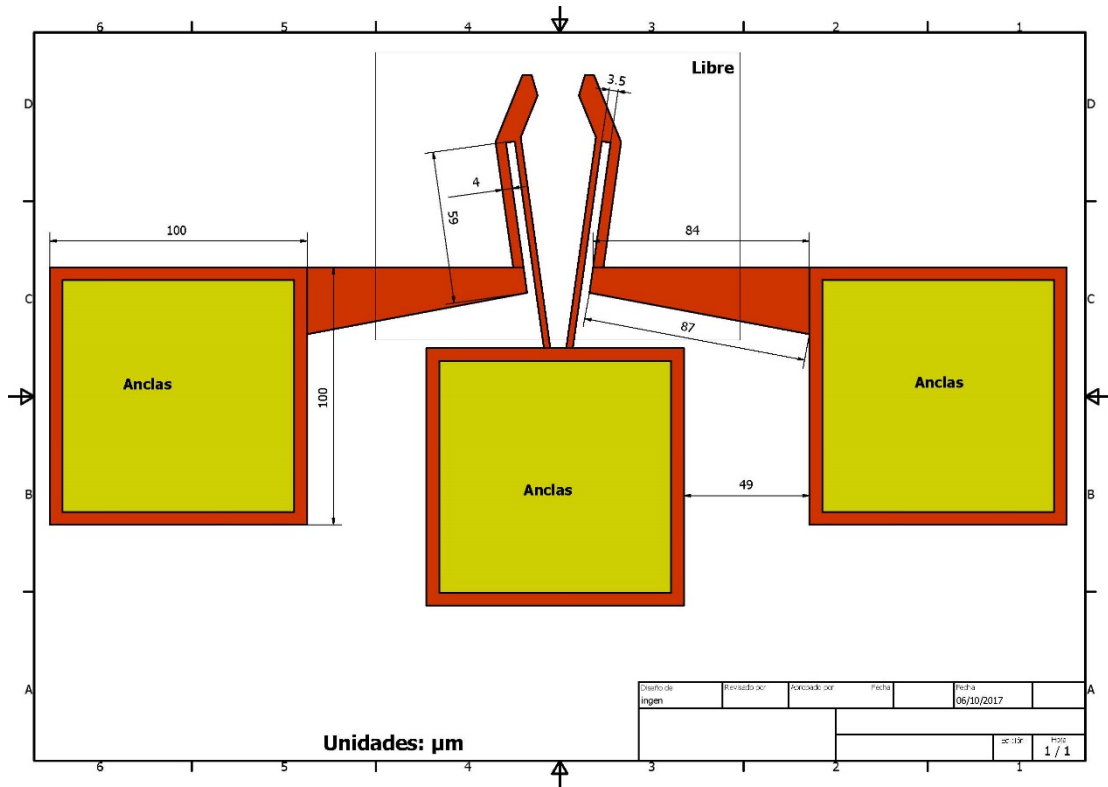


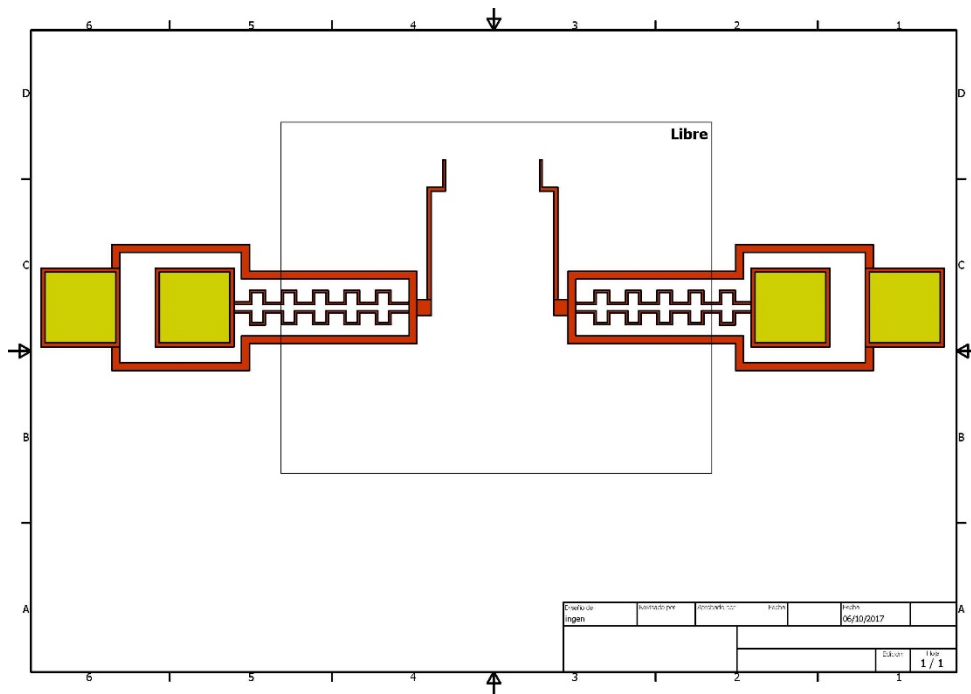
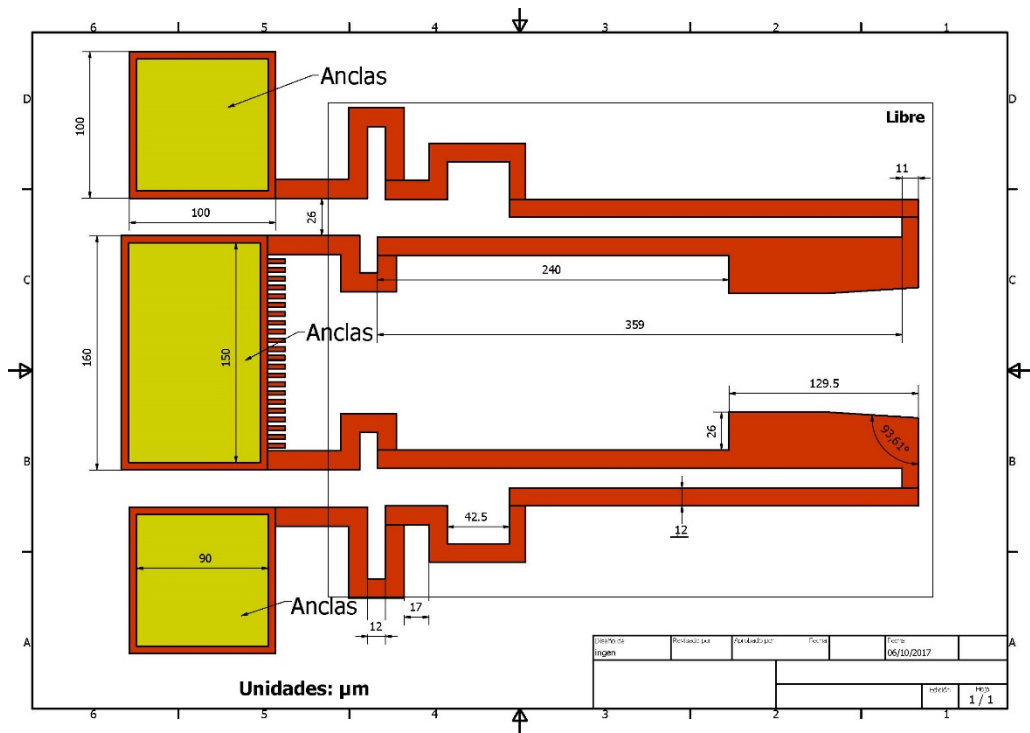
Anexo E. Microdispositivos adicionales

En las siguientes figuras se muestra a cada uno de los dispositivos:

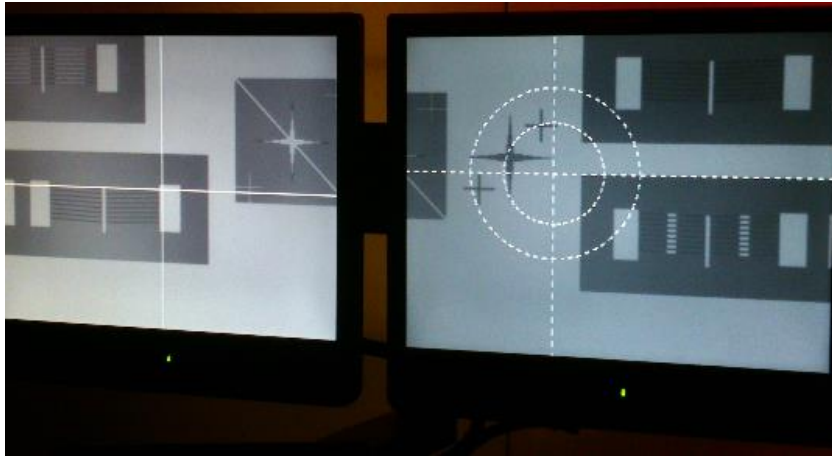








Elementos fabricados:

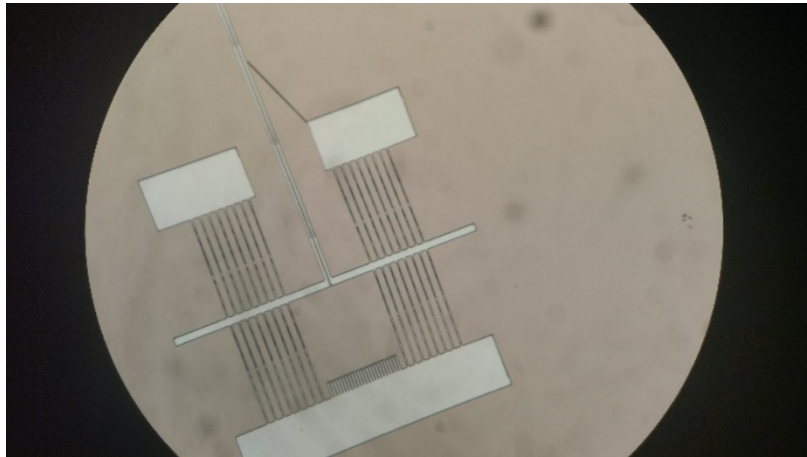


a)

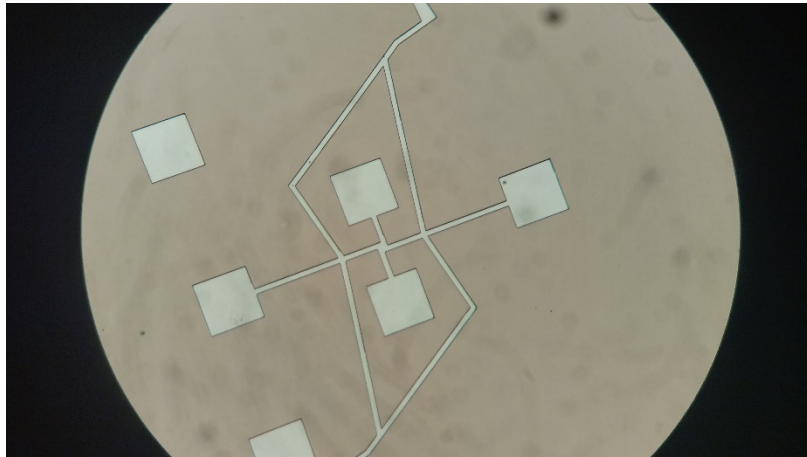


b)

- a) Microactuador Chevrón convencional y b) microactuador Chevrón con reguladores de movimiento extendidos, con base en la teoría de diafragmas de Stephen Beeby, microactuadores Chevrón para ser liberados, fueron fabricados en el laboratorio de microelectrónica PolyMEMS-INAOE



a)



b)

- a) Micropinza tipo resonador con dispositivo como elemento actuador al Chevrón, la micropinza tiene acoplada un microcantilever como un elemento sensor de movimiento y fuerza b) Media estructura de la micropinza que hace uso del pandeo de los microcantilevers en la parte central del dispositivo. Estos dispositivos fueron fabricados en proceso SOI, en el laboratorio de microelectrónica de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.