



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO

“Micromaquinado de estructuras
MEMS de prueba”

TESIS

Que presenta

CARLOS RODRÍGUEZ AVADÍA

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Directores de Tesis:

Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca

Dr. Salvador Mendoza Acevedo.

Agradecimientos.

Agradezco al CONACYT, por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Quiero agradecer a mis tutores, el Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca, ya que gracias a su entusiasmo, mentorías y consejos logré no solo desarrollarme académicamente, sino también personalmente. Además, quisiera agradecerle por la confianza otorgada para la realización de este proyecto. A mi tutor, el Dr. Salvador Mendoza Acevedo, ya que su participación en este proyecto fue fundamental para lograr los objetivos planteados. También, quiero agradecerle por todo el apoyo otorgado en esta pequeña travesía, por su orientación, consejos y mentorías. Son profesionistas excepcionales y les tengo un gran respeto.

Es necesario agradecer también a la Dra. Griselda Stephany Abarca Jiménez, por su asesoría y apoyo, que nos brindó en el punto culminante de este proyecto.

Quiero agradecer al Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional, ya que el desarrollo de esta tesis tuvo lugar dentro de las instalaciones del LNC Laboratorio Nacional de Micro y Nano Tecnologías (LNunT), así como también agradecer a todos los trabajadores que hicieron mi estadía en este centro, provechosa y llena de buenas experiencias.

También quiero agradecer a todos los miembros de la Sección de Electrónica del Estado Sólido y principalmente al equipo de VLSI, que en numerosas ocasiones me brindaron apoyo y mentoría.

Agradezco enormemente a mis padres, gracias a su apoyo, consejos y educación, logré cumplir mis metas. Así mismo, quiero agradecer a mis hermanos y hermanas, a la C.P. Sulma Gladis Ramos Abadía y su esposo, el ING. Marco Antonio Valdez Gutiérrez, que han estado presentes durante todo el desarrollo de este trabajo.

Por último, quiero agradecer a mis antiguos mentores, que con el pasar de los años, se han convertido en colegas y amigos: ING. Oscar Eduardo Palacios Vargas, Téc. Jorge Alberto Vázquez Bautista y al ING. Daniel Alejandro Palacios Lagunas.

Índice de contenido

Preliminares.....	ix
Resumen.....	x
Abstract.....	xi
Objetivos.....	xii
Objetivo general.....	xii
Objetivos específicos.....	xii
Capítulo I Antecedentes.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 MEMS.....	14
1.3 Tecnologías de fabricación para MEMS.....	18
1.4 Conclusiones.....	24
Capítulo II Diseño de estructuras.....	26
2.1 Introducción.....	26
2.2 Chip DRS.....	29
2.3 Chip C1.....	39
2.4 Chip C2.....	49
2.5 Chip C3.....	59
2.6 Chip C4.....	69
2.7 Conclusión.....	80
Capítulo III Simulaciones.....	81
3.1 Introducción.....	81
3.2 Simulación de estructuras.....	82
3.2.1 Cantiléver.....	83
3.2.2 Puentes.....	87
3.3 Conclusiones.....	91

Capítulo IV Fabricación de estructuras de prueba en el CNMN-IPN.....	92
4.1 Introducción.....	92
4.2 Depósito de aluminio.....	93
4.3 Fotolitografía.....	94
4.4 Grabado de aluminio.....	96
4.5 Conclusiones.....	99
Capítulo V. Pruebas experimentales y discusión de resultados.....	100
5.1 Introducción.....	100
5.2 Proceso A – Micromaquinado por fragmentación de tiempo.....	102
5.3 Proceso B - Micromaquinado con Resina.....	108
5.4 Proceso C – Limpieza previa y lavado extra.....	110
5.5 Discusión de resultados.....	115
5.6 Conclusiones.....	116
Capítulo VI – Conclusiones y trabajo a futuro.....	117
6.1 Conclusiones.....	117
6.2 Trabajo a futuro.....	118
Referencias.....	119
Anexos.....	122

Índice de Figuras.

Fig. 1- 1 Micromaquinado volumétrico	20
Fig. 1- 2 Membrana de óxido de silicio después de un micromaquinado volumétrico.	21
Fig. 1- 3 Micromaquinado superficial.	21
Fig. 1- 4 Acelerómetro después de un micromaquinado superficial. La capa estructural es de aluminio.	22
Fig. 2- 1 Cuarto amarillo clase 100.....	27
Fig. 2- 2 Cuarto blanco clase 100.....	27
Fig. 2- 3 Campana de ácidos y Bases	28
Fig. 2- 4 Campana de revelado	28
Fig. 2- 5 Heidelberg DWL 66fs.....	28
Fig. 2- 6 EVG 620	28
Fig. 2- 7 Perfilómetro Dektak 150.....	28
Fig. 2- 8 Cantilévers.....	30
Fig. 2- 9 Chip DRS.....	31
Fig. 2- 10 Cantilévers.....	32
Fig. 2- 11 Membranas.....	34
Fig. 2- 12 Termoactuador.....	35
Fig. 2- 13 Estructura tipo peine, DRS.....	36
Fig. 2- 14 Micro-pinza, DRS.....	38
Fig. 2- 15 Estructura tipo espiral.....	39
Fig. 2- 16 Chip C1.....	41
Fig. 2- 17 Estructura tipo peine, C1.....	42
Fig. 2- 18 Estructura tipo membrana, C1.....	43
Fig. 2- 19 Cantilévers, C1.....	45
Fig. 2- 20 Puentes, C1.....	47
Fig. 2- 21 Termoactuador, C1.....	48
Fig. 2- 22 Chip C2.....	50
Fig. 2- 23 Cantilévers y puentes, C2.....	51
Fig. 2- 24 Estructuras tipo peine.....	53

Fig. 2- 25 Membranas, C2.....	55
Fig. 2- 26 Membrana con desplazamiento en el eje -Z.	56
Fig. 2- 27 Resortes, C2.	57
Fig. 2- 28 Termoactuador, C2.....	58
Fig. 2- 29 Chip C3.....	60
Fig. 2- 30 Grupo 1 - Cantilévers, C3.	61
Fig. 2- 31 Grupo 2- Cantilévers, C3.....	62
Fig. 2- 32 Puentes, C3.....	64
Fig. 2- 33 Grupo 1 - Membranas, C3.	65
Fig. 2- 34 Grupo 2 - Membranas, C3.	66
Fig. 2- 35 Grupo 3 - Membranas, C3.	67
Fig. 2- 36 Resortes, C3.	68
Fig. 2- 37 Chip C4.....	70
Fig. 2- 38 Cantilevers, C4.....	71
Fig. 2- 39 Estructura tipo peine, C4.....	73
Fig. 2- 40 Estructura 4 - Tipo Peine, C4.....	74
Fig. 2- 41 Membranas, C4.....	76
Fig. 2- 42 Resortes, C4.	78
Fig. 3 - 1 Cantiléver C1, chip C2.....	84
Fig. 3 - 2 Cantiléver ch1, Chip C3.	84
Fig. 3 - 3 Simulación de cantilévers.....	86
Fig. 3 - 4 Puentes, Chip C2.....	88
Fig. 3 - 5 Simulación de puentes, Chip C2.	89
Fig. 4 - 1 Oblea de silicio post depósito de película delgada de aluminio.	94
Fig. 4 - 2 Spinner.....	95
Fig. 4 - 3 Spinner con oblea.	95
Fig. 4 - 4 Revelado.....	96
Fig. 4 - 5 Proceso de grabado de aluminio.....	97
Fig. 4 - 6 Chip DRS, previo a grabado de aluminio.....	98
Fig. 4 - 7 Chip DRS posteriormente del grabado de aluminio.....	98

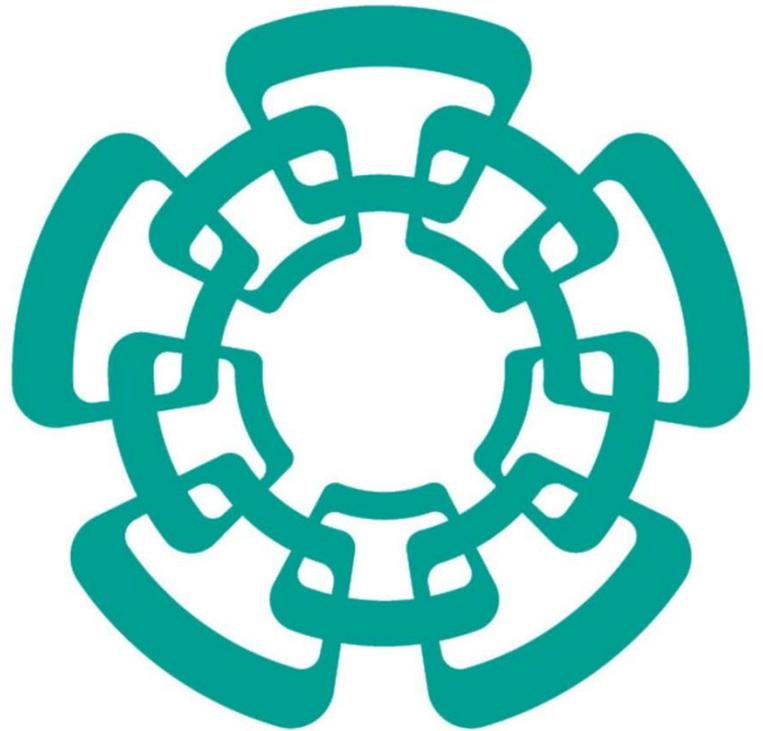
Fig. 5 - 1 Proceso de micromaquinado.	102
Fig. 5 - 2 Muestras para micromaquinado, microscopio óptico.	103
Fig. 5 - 3 Chips post micromaquinado.	105
Fig. 5 - 4 Cristalización de Silicio, microscopio electrónico de barrido.	106
Fig. 5 - 5 Pad deteriorado, microscopio electrónico de barrido.	106
Fig. 5 - 6 Acelerómetro, Chip CM2.	106
Fig. 5 - 7 Estructuras chip CM3.	107
Fig. 5 - 8 Muestra CM4 post micromaquinado.	109
Fig. 5 - 9 Muestra CM4 post micromaquinado.	109
Fig. 5 - 10 Acelerómetro, muestra CM5.	111
Fig. 5 - 11 Letra "T" sobre dedos del acelerómetro.	111
Fig. 5 - 12 Acelerómetro, muestra CM6.	112
Fig. 5 - 13 Cantiléver, muestra CM6.	112
Fig. 5 - 14 Resorte, muestra CM6.	112
Fig. 5 - 15 Micropinzas.	113
Fig. 5 - 16 Micropinzas Metal, Muestra CM8.	114
Fig. 5 - 17 Micropinzas Metal con inclinación, muestra CM8.	114

Índice de Tablas.

Tabla 2 - 1 Cantilevers, DRS.	33
Tabla 2 - 2 Membranas, DRS.	34
Tabla 2 - 3 Termoactuador, DRS.	36
Tabla 2 - 4 Estructura tipo peine, DRS.	37
Tabla 2 - 5 Micro-pinza, DRS.	38
Tabla 2 - 6 Estructura tipo peine, C1.	43
Tabla 2 - 7 Estructura tipo membrana, C1.	44
Tabla 2 - 8 Cantilévers, C1.	45
Tabla 2 - 9 Puentes, C1.	47
Tabla 2 - 10 Termoactuador, C1.	48
Tabla 2 - 11 Cantilévers, C2.	52

Tabla 2 - 12 Puentes, C2.....	53
Tabla 2 - 13 Estructura tipo peine principal, C2.	54
Tabla 2 - 14 Estructura tipo peine secundaria, C2.....	54
Tabla 2 - 15 Membranas con resorte, C2.	56
Tabla 2 - 16 Resortes, C2.	57
Tabla 2 - 17 Termoactuador, C2.....	58
Tabla 2 - 18 Grupo 1 - Cantilévers, C2.	62
Tabla 2 - 19 Grupos 2 - Cantilévers, C2.	63
Tabla 2 - 20 Puentes, C2.....	64
Tabla 2 - 21 Grupo 1, membranas, C3.	66
Tabla 2 - 22 Grupo 2 - Membranas, C3.	66
Tabla 2 - 23 Grupo 3 - Membranas, C3.	67
Tabla 2 - 24 Resortes, C3.	68
Tabla 2 - 25 Cantilévers, C4.	72
Tabla 2 - 26 Estructura tipo peine, C4.....	74
Tabla 2 - 27 Estructura 4 - Tipo Peine, C4.	75
Tabla 2 - 28 Membranas, C4.	77
Tabla 2 - 29 Resortes, C4.	78
Tabla 3 - 1. Cantiléver C1, Chip C2.....	86
Tabla 3 - 2. Cantiléver CH1, Chip C3.....	86
Tabla 3 - 3 Puente A, Chip C2.....	90
Tabla 3 - 4 Puente B, chip C2.....	90

Preliminares.



Cinvestav

Resumen

En la actualidad, los dispositivos MEMS son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, estos dispositivos se presentan, hasta en sistemas ópticos para telecomunicaciones, entre otras tantas. Gracias al avance tecnológico que se ha dado en los últimos años, se ha hecho posible que los dispositivos MEMS se proyecten incluso hasta en estructuras con escalas nanométricas con mejor eficiencia y costos de fabricación bajos.

Debido a que hay distintas tecnologías de fabricación de estructuras MEMS, en este proyecto se desarrolla dicho proceso de fabricación: iniciando desde la fotolitografía, hasta el proceso de micromaquinado requerido para estructuras elaboradas sobre el sustrato.

Sin embargo, este trabajo no se limita a la fabricación de estructuras, sino que se realiza el diseño topológico de las estructuras, además de la integración de modelado mecánicos por medio de diseño asistido por computadora; debido a que no se pueden diseñar estructuras de manera adecuada sin considerar las interacciones que ocurren en el sistema.

La visión general de este proyecto es el desarrollar diseños topológicos de estructuras, analizar las limitantes que se encuentran en la tecnología de fabricación del CNMN-IPN y de la tecnología CMOS a través de MOSIS y desarrollar un proceso óptimo de micromaquinado que sea compatible con las tecnologías ya mencionadas.

Abstract

Currently, MEMS devices are used in a variety of applications, these devices range from microfluidic detection systems to optical system for telecommunications, among others. Thanks to the rapid technological advancement during the recent years, this had made possible to the MEMS devices to even project these structures down to nanometric scales with better efficiency and lower manufacturing costs.

Due to the fact that there are different technologies for manufacturing MEMS structures, in this project a manufacturing process is developed: starting from photolithography, to the micromachining process required for structures elaborated on the substrate.

However, this work is no limited to the fabrication of structures. Also, the topological design of the structures is carried out, besides to the integration of mechanical modeling through computer-aided design; this is because a proper structure design cannot be done without considering the interactions that occur with the system.

The general vision of this project is to develop topological designs of structures, analyze the limitations found in the manufacturing technology of the CNMN – IPN and CMOS Technology through MOSIS and develop an optimal micromachining process compatible with the aforementioned technologies.

Objetivos

Objetivo general

Obtener un procedimiento óptimo para el micromaquinado superficial de estructuras MEMS a partir de estructuras de prueba con tecnología CNMN-IPN.

Objetivos específicos

- Determinar el proceso adecuado para la realización apropiada de micromaquinado superficial considerando capas de sacrificio de óxido de silicio y capas estructurales hechas de aluminio o silicio policristalino.
- Diseñar, simular y fabricar estructuras de prueba para evaluar la integridad física post- micromaquinado.
- Elaborar una propuesta de tecnología para la fabricación de estructuras MEMS de una sola capa.

Capítulo I Antecedentes.

1.1 Introducción

Como punto de partida en la historia del desarrollo de estructuras MEMS, algunos autores toman los primeros microsistemas desarrollados a finales de la década de 1980 que fueron mostrados en el congreso de Tokio; en cambio, algunos otros desde el momento en que se acuñó el término MEMS y micromaquinado, el cual fue a partir de 1982 [1,2].

Sin embargo, todos coinciden en que los MEMS constituían principalmente dispositivos monocristalinos con al menos una de sus dimensiones micrométricas, teniendo un hito con el descubrimiento de silicio poroso, ya que esto dio origen a nuevos dispositivos como sensores electroquímicos, membranas, dispositivos fotoluminiscentes, etc.

La evolución de dispositivos MEMS está enfocada al desarrollo de elementos de mayor capacidad de procesamiento y de impulsar un régimen de estructuras de pocos nanómetros, logrando tener una mayor cantidad de dispositivos en un chip.

La capacidad de miniaturización de las estructuras MEMS o escalamiento, está ligada al conjunto de efectos físicos que surgen o cambian cuando la escala dimensional se modifica en uno o más ordenes de magnitud; los fenómenos que comúnmente son insignificantes a macroescala, pueden volverse importantes e incluso dominantes a micro y nanoescala;

El escalamiento de sistemas promete grandes beneficios como es el de integrar un mayor número de estructuras en un sistema, reducción de energía, mayor capacidad de procesamiento y sistemas más ligeros.

Este capítulo tiene el propósito principal de definir las estructuras MEMS, así como su proceso de fabricación, clasificación y el vínculo que comparte con la fabricación

de circuitos integrados. Asimismo, se hablará sobre las tecnologías de fabricación dedicadas a estructuras MEMS, desventajas y ventajas de los procesos de fabricación y conocer los laboratorios que cuentan con capacidad de elaboración de estructuras MEMS.

1.2 MEMS

Hablando estrictamente sobre la terminología del acrónimo MEMS, ésta se define como microsistemas electromecánicos (*micro-electro-mechanical systems, por su terminología en inglés*); sin embargo, en la actualidad muchos microsistemas no cuentan con estructuras mecánicas o partes móviles, así como también pueden estar exentos de sistemas eléctricos. Un ejemplo de esto son los sistemas de micro canales de fluido o los sistemas ópticos [1].

Hoy en día la ciencia y la ingeniería ha logrado ampliar el significado de MEMS, por ende, es difícil de englobar todos los dispositivos que se pueden desarrollar; en gran parte de Europa los dispositivos MEMS se conocen simplemente como microsistemas o tecnología de microsistemas (*micro systems technology, por su terminología en inglés*), mientras que en el Reino Unido lleva por nombre micro-ingeniería [2].

Los primeros dispositivos MEMS se desarrollaron con silicio policristalino, ya que este material no solo tiene propiedades eléctricas buenas, sino que también está dotado con propiedades mecánicas excelentes; actualmente se pueden fabricar MEMS de una variedad de compuestos, como son el arseniuro de galio (GaAs), germanio (Ge), óxido de silicio (SiO₂), aluminio (Al), fosforo de indio (InP), entre otros, pero el mayor desarrollo se ha dado con el silicio.

El desarrollo de los dispositivos MEMS está ligado con la tecnología de circuitos integrados (IC), debido a que estos dispositivos se fabrican con procesos propios de la tecnología IC [3].

La tecnología utilizada para la fabricación de IC se basa principalmente en la transferencia de patrones bidimensionales, así como también en el depósito de material sobre un sustrato, y el ataque selectivo de diferentes capas, entre otros.

Se debe tomar en cuenta que la tecnología utilizada en IC da como resultado estructuras planas, es decir, en dos dimensiones únicamente, y, debido a que los dispositivos MEMS son estructuras complejas que necesitan al menos un grado de libertad, se necesita agregar una serie de pasos extras en el proceso de fabricación [4]. Esto, en consecuencia, se deriva en estructuras tridimensionales, pues se aprovecha también el volumen del sustrato o la película delgada depositada sobre el sustrato, no solo la superficie.

Esto se logra con el llamado proceso de micromaquinado, que consiste en el ataque selectivo, ya sea volumétrico o superficial, de diferentes capas, lo que da como resultado una estructura volumétrica, a diferencia de los circuitos integrados, que como ya se mencionó, son estructuras generalmente consideradas de dos dimensiones.

Los microsistemas se clasifican en actuadores y sensores. Los primeros pueden incluir microactuadores como: pinzas, relés e interruptores, válvulas y bombas, así como sistemas ópticos como lentes y mecanismos de alineación; los segundos, se tienen microsensores como: sensores ópticos, de presión, térmicos, inerciales, entre otros.

Por otro lado, los avances tecnológicos logrados en los últimos años, han permitido encontrar una enorme variedad de aplicaciones para estos dispositivos, que van desde biosensores, que se aplican para el monitoreo de signos vitales, en comunicaciones, como los usados en los teléfonos celulares o los giroscopios, que se emplean en la navegación aérea; en la industria automotriz, donde la aplicación de los MEMS han encontrado gran aceptación para su uso en el sensado de los diferentes parámetros mecánicos y eléctricos de los autos, como la presión del aceite, el aire de las llantas, estabilidad del sistema de suspensión, desplegado de las bolsas de aire, etc. Existen aplicaciones en el sistema aeroespacial, en la

industria farmacéutica, en la agricultura, electrónica de entretenimiento, en fin, sus aplicaciones son tan extensas como puede ser la imaginación del diseñador, con base a las necesidades que se quieren atender.

La oferta comercial de los MEMS es lo suficientemente amplia como para tener muchas opciones de diseño de sistemas que se pueden desarrollar para ofrecer productos y soluciones integrales que faciliten y mejoren la atención de los diversos problemas que existen en la vida cotidiana y en muchos ámbitos. Esto los hace atractivos tanto en el área de la investigación, como para los emprendedores que desean establecer un negocio redituable.

Desde el punto de vista tecnológico, existen en el mundo diferentes fábricas y laboratorios que cuentan con las facilidades para el diseño y fabricación de este tipo de dispositivos. Entre los laboratorios que tienen gran infraestructura y experiencia, se puede mencionar a los Laboratorios Sandia [5], donde desde hace años han demostrado gran capacidad para la elaboración de microestructuras. Otro laboratorio también se encuentra en la Universidad de Carnegie Mellon [6], y la Universidad de California en Berkley [7], donde se proponen, diseñan, simulan y prueban nuevas estructuras MEMS.

Ahora, una opción comercial que permite la fabricación de prototipos orientados ya sea a la investigación o para comercio, la ofrece MEMSCAP [8], en la cual se pueden enviar los diseños propios, y con un costo extra, se pueden solicitar la realización del micromaquinado, pero también está la opción de que el usuario realice en sus propios laboratorios este proceso, si cuenta con las facilidades e infraestructura para hacerlo.

En México se carece de este tipo de facilidades. En el INAOE [9] se cuenta con una línea para la fabricación de Circuitos Integrados CMOS, pero también para la fabricación de estructuras MEMS. Es un laboratorio que continúa en exploración y adaptación, y está generando paralelamente proyectos tecnológicos y temas de investigación relacionados con el desarrollo de los MEMS.

En el año 2009 fue creado el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional (CNMN-IPN) [10], con el objetivo de impulsar las nanociencias, así como las micro y nanotecnologías, entre las que se requieren para conseguir la fabricación de estructuras MEMS. Este Centro se ha estado equipando con infraestructura tecnológica, para lograr estos objetivos, lo que incluye cuartos limpios o también llamados salas blancas, Clase 1000 y Clase 100; Campanas para procesos químicos para micromaquinado húmedo o equipos de decapado en seco con base a reacción iónica (*RIE*); equipos para depósito de metales, como evaporadores o pulverización catódica (*sputtering*). Se cuenta también con equipo para caracterización, como un microscopio electrónico de barrido (*SEM, Scanning Electron Microscope*) y microscopio óptico. Tiene además un equipo para la caracterización eléctrica, Keithley 4200 SCS, alineadora para la fabricación de mascarillas y procesos fotolitográficos, así como alambradora para el encapsulado de chips.

Fue en este laboratorio en el que se desarrolló esta tesis, en la que se proponen estructuras de prueba, tanto de sensores como de actuadores, empleando como capa estructural al aluminio y como capa de sacrificio, al dióxido de silicio. Se presentan las actividades llevadas a cabo, que servirán para crear una base metodológica que ayude en el propósito de crear una línea de fabricación de MEMS, actividades que incluyen el diseño, simulación, fabricación, micromaquinado y caracterización.

1.3 Tecnologías de fabricación para MEMS

Hay que mencionar que se tienen tecnologías dedicadas, que son exclusivamente diseñadas para la fabricación de estructuras MEMS, como la mencionada de MEMSCAP, donde las características de los materiales y capas usadas están específicamente dirigidas para cumplir con los requerimientos que permitan un óptimo desempeño de las estructuras tridimensionales. Sin embargo, estas tecnologías dedicadas no cuentan con la facilidad para la realización de dispositivos CMOS típicos para la configuración de circuitos integrados, como la ofrecida por las fábricas de silicio de tecnología CMOS, con las cuales sí es posible la integración de circuitos electrónicos, pero no tienen posibilidad para incluir estructuras MEMS.

Por lo tanto, para poder contar con circuitos de polarización y procesamiento de señales, se requiere un chip adicional que cumpla con estos propósitos, lo que implica la interconexión de dos chips. Lo anterior implica que se introduzcan algunos elementos parásitos que se tienen que compensar adicionalmente, para lograr un buen funcionamiento, aumentando la complejidad y tamaño de los sistemas.

En ambas opciones, es decir, tecnologías MEMS dedicadas y fábricas de silicio CMOS, ofrecen la fabricación de corridas con propósitos comerciales. Así como la elaboración de prototipos académicos, obviamente con un diferencial de costos dependiendo de la capacidad de recursos económicos.

Como alternativa a lo anterior, existe la llamada tecnología CMOS-MEMS, que consiste en la inclusión en un solo chip o “dado” tanto de estructuras MEMS como de dispositivos CMOS, lo que elimina el problema introducido por los elementos parásitos, reduce la complejidad del sistema, así como el área empleada. Un ejemplo de esto se tiene con la marca *Analog Devices* [11], uno de los mayores fabricantes de dispositivos semiconductores, entre los que se cuenta con los dispositivos MEMS en sus diferentes variedades.

Gracias a las diferentes opciones de fábricas, actualmente se pueden encontrar una enorme variedad de productos comerciales basados en la tecnología CMOS-MEMS

que son usados para el diseño y construcción de sistemas electrónicos dentro de los campos de investigación, industrial, médico, entretenimiento, comunicaciones y varios más.

Respecto a la clasificación para la fabricación de los dispositivos MEMS, ésta podría darse con base a diferentes factores, como la técnica del proceso, según si el micromaquinado es húmedo o seco. También puede ser según su complejidad y compatibilidad del proceso con los materiales, y por supuesto el costo. Con respecto al tipo de micromaquinado, se tienen dos tipos, que son el micromaquinado volumétrico y el de superficie, que son los más usados en la fabricación de dispositivos MEMS [12].

El micromaquinado volumétrico se basa en hacer un ataque selectivo en el cual se eliminará parte del material del sustrato para crear estructuras como vigas, placas o membranas; lo anterior puede realizarse mediante grabado húmedo o seco, y estos pueden ser dependientes de la orientación cristalográfica del material (anisotrópicos) o independientes de esta característica (isotrópicos) [13].

Una de las desventajas del grabado isotrópico es debido a que éste es dependiente a la temperatura, por lo tanto, se vuelve difícil de controlar el ataque a la geometría vertical y lateral. En la Fig.1-1, se encuentra el resultado de hacer un micromaquinado volumétrico. En esta figura podemos ver la desventaja del grabado isotrópico, en ella se encuentran dos variables. En la figura a) se encuentra un grabado isotrópico el cual fue agitado en el momento del grabado, mientras que en la figura b) no se agitó; en la figura c) se encuentra un grabado anisotrópico, en el cual, debido a la orientación que tienen los laterales, tiene una menor tasa de ataque (orientación $\langle 111 \rangle$), mientras que la tasa de ataque en la orientación $\langle 100 \rangle$ es mayor.

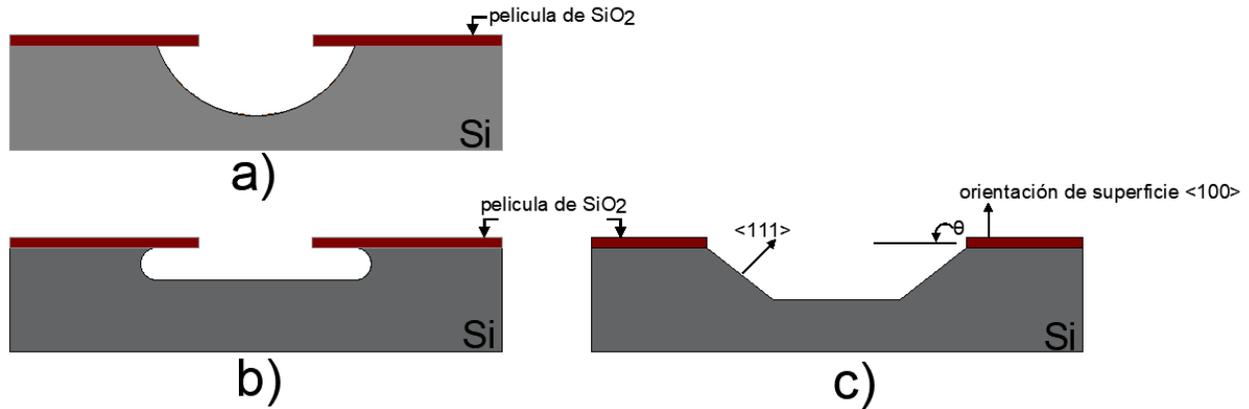


FIG. 1- 1 MICROMAQUINADO VOLUMÉTRICO
a) Grabado isotrópico: con agitación. b) Grabado isotrópico: sin agitación. c) Grabado anisotrópico.

El ataque anisotrópico se utiliza cuando se necesitan estructuras bien definidas; debido a que la densidad atómica es mucho mayor en plano $\langle 111 \rangle$ que, en los otros planos, esto permite que la tasa de ataque sea menor, y por ende tiene un menor desgaste, logrando hacer estructuras muy definidas.

Es importante mencionar que normalmente en este tipo de micromaquinado, no existe ningún sistema eléctrico por debajo de las estructuras formadas. En la Fig.1-2 se encuentra una membrana hecha con micromaquinado volumétrico, esta figura fue realizada con un ataque anisotrópico, y en ella se puede ver la cavidad que se forma debido al ataque hecho por la solución atacante.

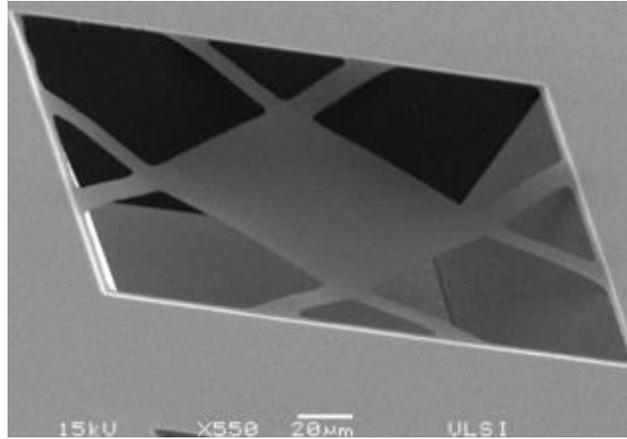


FIG. 1- 2 MEMBRANA DE ÓXIDO DE SILICIO DESPUÉS DE UN MICROMAQUINADO VOLUMÉTRICO.

Por el otro lado, para formar estructuras utilizando micromaquinado superficial es necesario tener al menos dos capas de distinto material que el sustrato; estas capas estarán sobre el sustrato, y mediante el ataque selectivo se hace un grabado húmedo o seco, para así formar las estructuras deseadas. Una de estas capas es la estructural, que será la que precisamente forme la estructura tridimensional. La segunda capa, es la llamada capa de sacrificio, sobre la que se deposita la capa estructural, y que al final del proceso, será eliminada para liberar la estructura mediante un proceso de micromaquinado empleando alguna de las técnicas ya mencionadas.

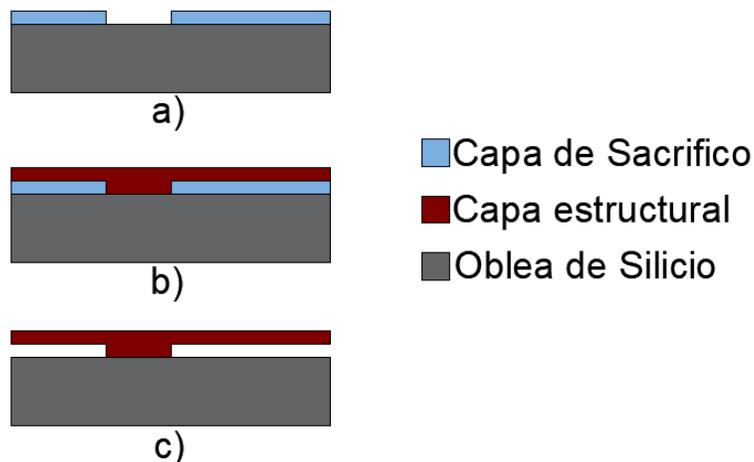


FIG. 1- 3 MICROMAQUINADO SUPERFICIAL.

En general y brevemente, la secuencia del proceso del micromaquinado superficial se encuentra en la Fig. 1-3, este proceso consiste en la deposición de películas delgadas; la primer película depositada es una capa de sacrificio, posteriormente mediante un proceso de fotolitografía, se realiza la transferencia de patrones (Fig.1-3 a.); después de esto, se deposita la capa estructural (Fig. 1-3b.) y por último, se hace un grabado químico para eliminar la capa de sacrificio y así poder liberar la estructura (Fig. 1-3c.).

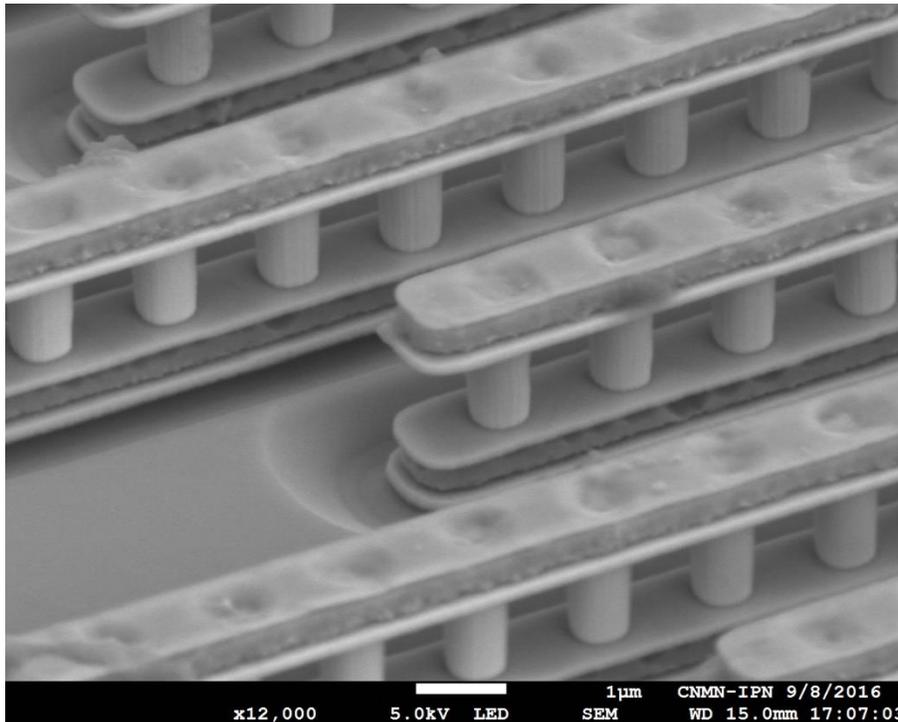


FIG. 1- 4 ACELERÓMETRO DESPUÉS DE UN MICROMAQUINADO SUPERFICIAL. LA CAPA ESTRUCTURAL ES DE ALUMINIO.

En este tipo de procesos se aprovechan las distintas tasas de grabado de cada material, haciendo así un ataque selectivo. Por ende, el reactivo utilizado para el grabado debe de tener una velocidad de ataque mayor con la capa de sacrificio que con la capa estructural [3-12]. Este último tipo de micromaquinado, es el que se exploró para el desarrollo de esta tesis, llevado a cabo en los laboratorios del CNMN-IPN, y que se explicará a lo largo de la tesis.

Una de las ventajas que se tiene al utilizar esta técnica es que permite fabricar estructuras extremadamente pequeñas y delgadas, en la Fig. 1-4 se encuentra un acelerómetro fabricado con esta técnica de micromaquinado [30]. La principal desventaja que se tiene es que existe un número limitado de capas que se pueden depositar.

1.4 Conclusiones

Las estructuras MEMS forman una parte fundamental en el desarrollo de la ciencia y la tecnología; la evolución de los microsistemas permite mejorar la capacidad de procesamiento de señales, miniaturización de los sistemas y reducción de costos de fabricación.

En el desarrollo de estructuras MEMS se ha encontrado una variedad extensa de aplicaciones para estos dispositivos; actualmente se encuentran estructuras MEMS en los giroscopios, teléfonos celulares, en la navegación aérea y etc. Debido a que existe una demanda en la fabricación de estructuras MEMS, existe una gran variedad de opciones comerciales que permiten la fabricación de dispositivos, ya sea para uso comercial o para aplicaciones orientadas a la investigación.

Estas fábricas y laboratorios cuentan con facilidades de diseño y fabricación de este tipo de dispositivos, ya que cuentan con gran infraestructura y experiencia para la elaboración de este tipo de estructuras. Estos laboratorios y fabricas desarrollan estructuras MEMS con tecnologías dedicadas.

Debido a que las tecnologías dedicadas en la fabricación de estructuras MEMS no cuentan con la facilidad de fabricar dispositivos CMOS, existe la tecnología que fusiona ambos elementos, la cual se hace llamar tecnología CMOS-MEMS. El uso de la tecnología CMOS-MEMS elimina y/o reduce los efectos parásitos que se tendrían con chips realizados con tecnología dedicada a los MEMS por un lado y de los dispositivos CMOS por el otro.

Los dispositivos fabricados con tecnología CMOS-MEMS incluye en un solo chip las estructuras MEMS y los dispositivos CMOS, mientras que en el caso de tecnologías dedicadas se requiere un chip adicional que cumpla con el propósito de procesamiento de señales y polarización de circuitos.

La fabricación de dispositivos MEMS se basa en el micromaquinado; esta técnica de fabricación consiste en eliminar parte del material para formar estructuras. Este material puede ser parte del sustrato (micromaquinado volumétrico), o bien, pueden ser capas depositadas sobre el sustrato (micromaquinado superficial).

Capítulo II Diseño de estructuras.

2.1 Introducción

Como ya se ha mencionado, el micromaquinado es un proceso clave dentro de la fabricación de las estructuras MEMS, de ahí la importancia de contar con un procedimiento óptimo para la liberación adecuada de las estructuras. Este trabajo tiene como finalidad establecer un proceso óptimo de micromaquinado superficial, a partir del cual se cuente con las bases para contar con la tecnología para la fabricación de estructuras MEMS.

Para el diseño de las estructuras de prueba, es requisito tomar en cuenta las limitaciones propias de toda tecnología, como lo son: equipo y resolución de los procesos fotolitográficos (entre 1 μm y 5 μm), tipo y materiales empleados tanto para las capas estructurales como para las capas de sacrificio, y facilidades para micromaquinado, ya sea húmedo o seco. Es necesario también, contar con el equipamiento que permita la evaluación estructural de los elementos propuestos, con la finalidad de contar con elementos que permitan estimar la calidad de los procesos bajo prueba. Pero estas especificaciones tecnológicas deberán estar acompañadas de herramientas de simulación, lo que permite analizar diferentes propuestas desde el punto de vista mecánico y estructural, con lo que se optimizan esfuerzos y recursos.

En cuanto al tipo de estructuras que se decidió proponer, se encuentran los capacitores de placas paralelas en configuración peine, las cuales son muy empleadas para la fabricación de acelerómetros; estructuras tipo trampolín o cantiléver, empleados como resonadores, entre otras cosas; membranas, empleadas como sensores de presión, interruptores RF o micro-válvulas; actuadores termoeléctricos, usados como micro-pinzas o interruptores accionados por temperatura.

Los elementos que se emplearon en este desarrollo fueron los siguientes:

- Obleas de Silicio (Si) de 4" de diámetro, orientación (100)
- Espesor de óxido de silicio (SiO_2) de 500 nm (capa de sacrificio)
- Metalización Aluminio (Al) mediante pulverización catódica (Sputtering)

Las figuras 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, muestran algunas de las facilidades que se usaron para la realización de este trabajo. Ahora, para el diseño topológico de las estructuras de prueba, se empleó el software L-Edit. Una vez creados los diseños topológicos de las diferentes propuestas a analizar, se utilizó la alineadora EVG 620 (Fig. 2-6.) para la transferencia de patrones a la oblea oxidada y metalizada, haciendo el posterior proceso fotolitográfico, también se utilizó el perfilómetro mecánico de superficie DEKTAK 150 (Fig. 2-7) para conocer el espesor del metal depositado en las obleas.



FIG. 2- 1 CUARTO AMARILLO CLASE 100



FIG. 2- 2 CUARTO BLANCO CLASE 100



FIG. 2- 3 CAMPANA DE ÁCIDOS Y BASES



FIG. 2- 4 CAMPANA DE REVELADO



FIG. 2- 5 HEIDELBERG DWL 66FS



FIG. 2- 6 EVG 620



FIG. 2- 7 PERFILÓMETRO DEKTAK 150

Las características a evaluar en las estructuras de prueba fueron:

- Ancho mínimo de las pistas metálicas
- Longitud mínima y máxima de los brazos o dedos
- Separación mínima y máxima entre los brazos o dedos
- Eficiencia de la configuración de las anclas
- Dimensiones óptimas para las membranas, tanto cuadradas como circulares
- Separación, número y tamaño de los arreglos de perforaciones en las membranas, para aceleración del micromaquinado
- Tipos y configuración de los resortes para los acelerómetros.

Este tipo de estructuras se procesaron de diferentes chips o diseños, que serán los que se describan a detalle en las siguientes secciones. La evaluación de los anteriores aspectos, desde el punto de vista estructural y mecánico, durante y posterior al micromaquinado, permitirá definir la estrategia a seguir para la optimización del proceso tecnológico de este tipo de estructuras MEMS y perfilar una tecnología para la creación de dispositivos en las instalaciones que se emplearon.

2.2 Chip DRS

El antecedente de este chip son las estructuras básicas o primitivas que se encuentran en la literatura, un ejemplo de ello son los cantilevers que se muestran en la Fig. 2-8; la finalidad de estos diseños es la de obtener las bases para los chips diseñados posteriormente.

El conjunto de estructuras diseñadas, se desarrollaron para obtener un panorama amplio del comportamiento de las estructuras post-micromaquinado. Por ello, a cada una de las estructuras se les modificó el ancho, el largo o en su defecto, ambos parámetros, y así obtener una base de datos amplia para poder definir y delimitar las características mínimas de las dimensiones que pueden tener las futuras estructuras; las estructuras se clasificaron de la siguiente manera:

- Tipo trampolín (cantilévers).

- Membranas.
- Termoactuadores.
- Estructura tipo Peine.
- Micro-pinzas.
- Espiral.

En la Fig. 2-9 se encuentra el diseño topológico (layout) del chip DRS, la distribución de cada una de las estructuras que se encuentran en el layout se hizo con la intención de aprovechar el mayor espacio posible, y tener una cantidad considerable de estructuras para evaluar; a grandes rasgos algunos cantilevers comparten ancla, incluso pueden llegar a estar sujetos por más de un punto de anclaje.

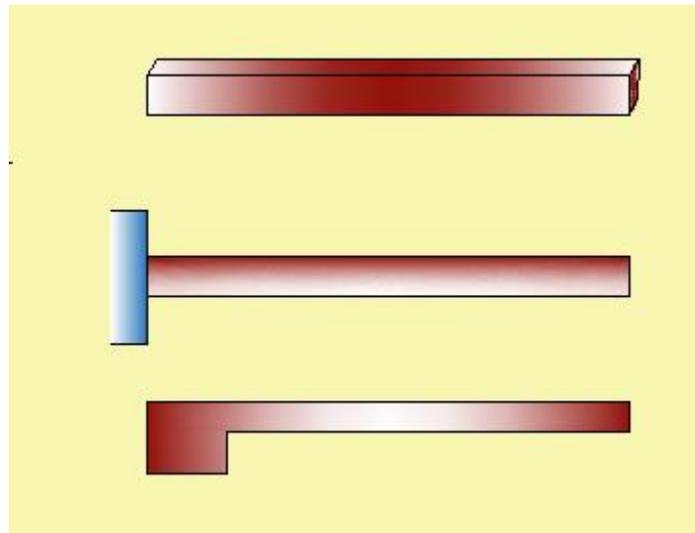


FIG. 2- 8 CANTILÉVERS

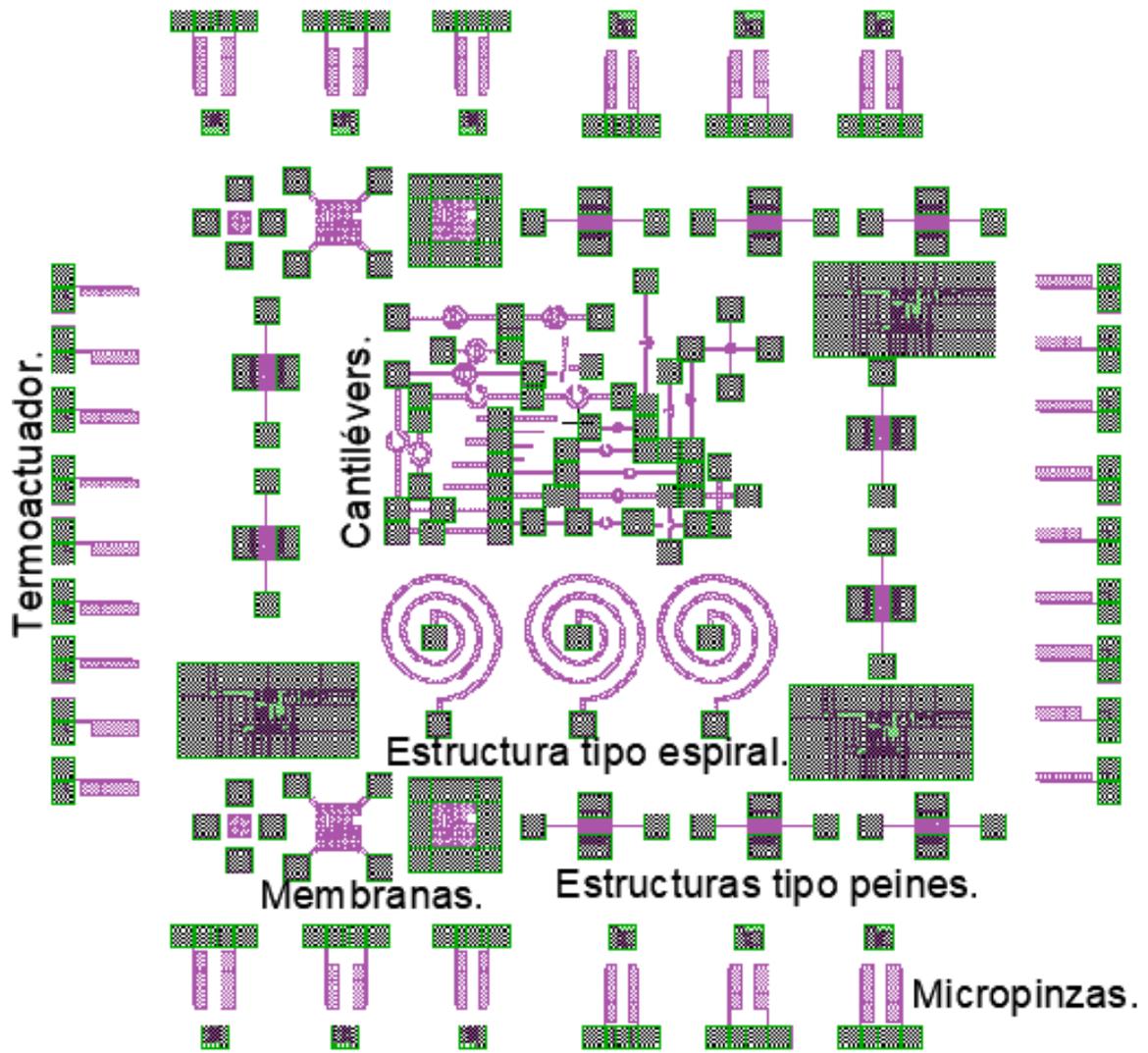


FIG. 2- 9 CHIP DRS.

➤ Estructura tipo trampolín (cantiléver)

Como ya se mencionó anteriormente, los cantilévers presentes en este diseño se tomaron como base para el diseño de los cantilévers que se encuentran en los próximos chips, así como también las estructuras tipo puente. En la Fig. 2- 10 se encuentra el segmento del layout que corresponde a estas estructuras.

La distribución que se le dio a estas estructuras fue para aprovechar el espacio, así como también el de utilizar las anclas para más de una estructura. Claro, hay otras estructuras que no comparten el ancla, pero esto es debido al tamaño que tienen las mismas estructuras.

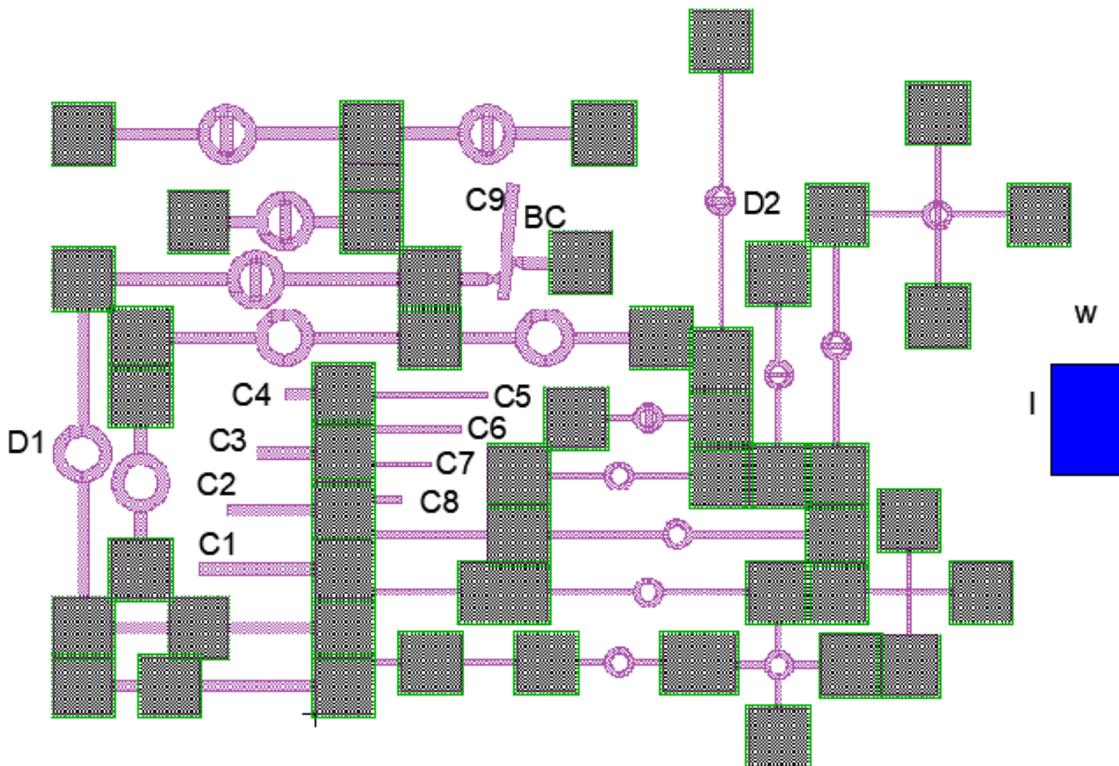


FIG. 2- 10 CANTILÉVERS

Dentro de la Fig. 2-10 se encuentran algunas letras acompañadas de números, estas letras se le agregaron a algunos cantilévers y a estructuras tipo puente; los cantiléver van desde C1 hasta C9, mientras que los puentes que contienen una

masa en el centro de la estructura, solamente están desde D1 y D2; también se encuentra un BC, que da a lugar a los brazos que sujetan al cantiléver C9.

En este chip solamente hay 9 cantilévers de diferentes dimensiones, mientras que en las estructuras tipo puente hay una gran variedad de variación en las dimensiones, por ello solo se agruparon dependiendo del tamaño de la circunferencia que se encuentra en el centro de la estructura, en la tabla 2- 1 se encuentra esta información.

Objeto/dimensión	w	l	r1	r2
Cantilever (C1)	200 μm	20 μm	-	-
Cantilever (C2)	150 μm	20 μm	-	-
Cantilever (C3)	100 μm	20 μm	-	-
Cantilever (C4)	50 μm	20 μm	-	-
Cantilever (C5)	200 μm	10 μm	-	-
Cantilever (C6)	150 μm	10 μm	-	-
Cantilever (C7)	100 μm	10 μm	-	-
Cantilever (C8)	50 μm	10 μm	-	-
Cantilever (C9)	37.35 μm	200 μm	-	-
Brazo cantilever (BC)	64.5 μm	20 μm	-	-
D1	-	-	30 μm	50 μm
D2	-	-	15 μm	25 μm
Brazo D1	20 μm	200 μm	-	-
Brazo D2	10 μm	200 μm	-	-

TABLA 2 - 1 CANTILEVERS, DRS.

El límite superior de los brazos de las estructuras tipo puente es de 200 μm , como se puede ver en la Tabla 2 – 1, mientras que el límite inferior es de 50 μm en la dimensión “w”, mientras que la dimensión “l” solamente toma dos valores, que son los de 20 μm y 10 μm .

➤ Membranas.

Las membranas diseñadas en este chip se basan en una estructura cuadrada, con cierto número de orificios, lo cual facilita el micromaquinado de la estructura. Como se observa en la Fig. 2-11, se trazaron 3 membranas; la primera de ellas es una membrana que consta de una matriz de 3x3 orificios, esta membrana se encuentra

sujeta por cuatro brazos, la segunda membrana al igual que la primera, se encuentra sujeta por cuatro brazos, sin embargo, esta membrana tiene una matriz de 6x6 orificios. La segunda membrana y la tercera membrana tienen el mismo tamaño, sin embargo, esta última se encuentra anclada por todo el perímetro de la misma, en la tabla 2-2, se encuentran las dimensiones de cada estructura.

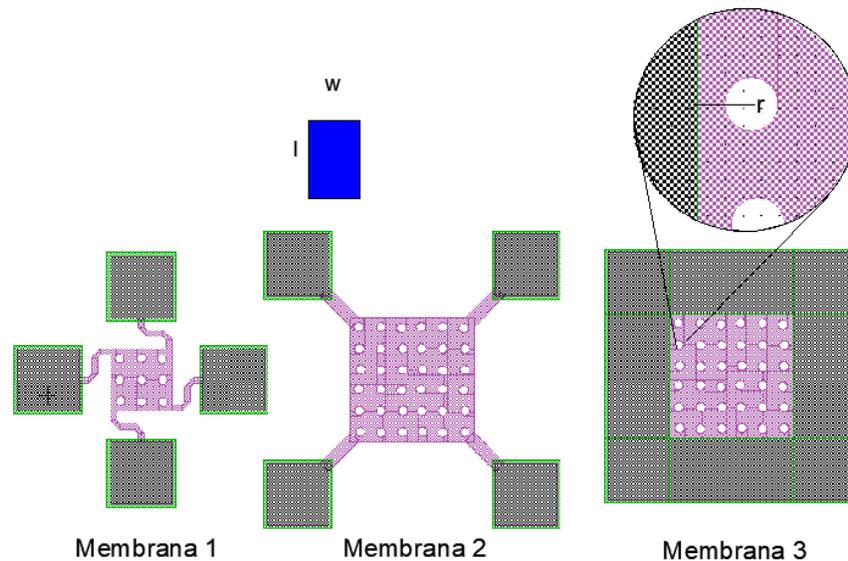


FIG. 2- 11 MEMBRANAS.

Los orificios que tienen las membranas tienen el mismo diámetro; en la membrana 3, al ser una estructura que está anclada por todo el perímetro, necesita una brecha por la cual la solución logre atacar la capa de sacrificio, y así poder liberar la estructura, de otro modo, se necesitaría reducir el anclaje en esta estructura para poder atacar al SiO₂, que se encuentra debajo de la capa estructural.

Objeto/dimensión	w	l	r
Membrana 1	100 μm	100 μm	-
Membrana 2	200 μm	200 μm	-
Membrana 3	200 μm	200 μm	-
orificio	-	-	7.5 μm
Brazo membrana 1	10 μm	70 μm	-
Brazo membrana 2	20 μm	70 μm	-

TABLA 2 - 2 MEMBRANAS, DRS.

➤ Termoactuador.

El termoactuador diseñado en este chip, es un dispositivo básico; este termoactuador está dividido en cuatro partes, la primera es un brazo corto, que está anclado por un extremo y por el otro está sujeto a una placa, el segundo segmento de este dispositivo, está formado por un brazo ancho, este brazo se encuentra de manera paralela al brazo angosto, sin embargo este brazo es poco más de 3 veces el ancho del brazo corto, este brazo se encuentra anclado en un extremo, mientras que en otro extremo está sujeto a una pequeña lámina que une el brazo ancho con la placa. El tercer componente es una lámina que se encuentra uniendo el extremo superior del brazo largo y la placa, y como último componente se encuentra la placa, que se encuentra sujeta por la lámina y el brazo corto, en la Fig. 2 - 12 se encuentra esta estructura, mientras que en la Tabla 2 – 3, se encuentran las dimensiones de cada segmento de la misma.

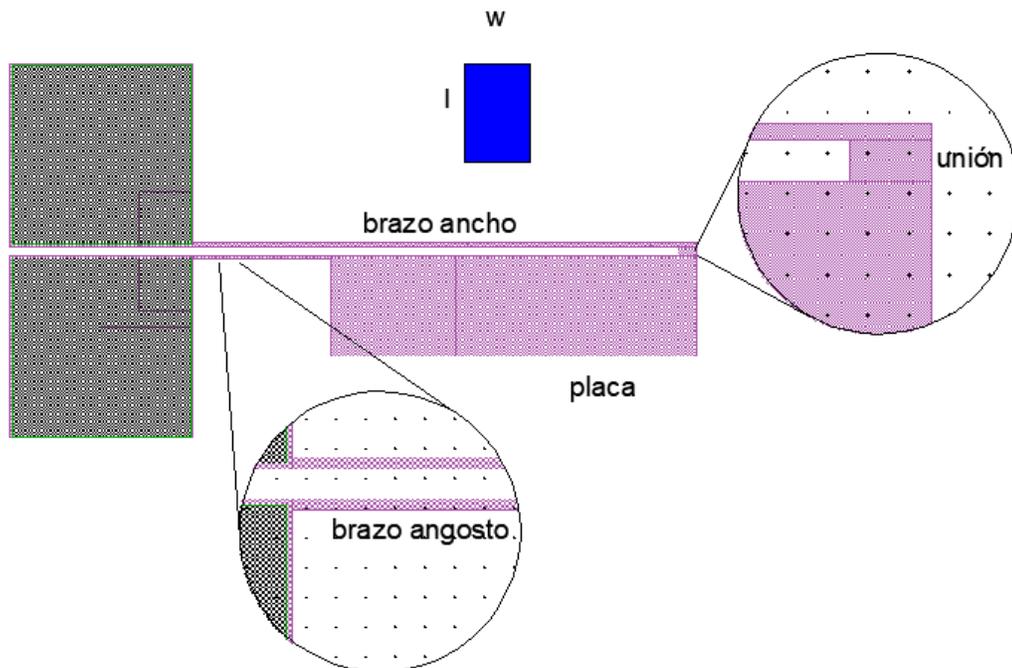


FIG. 2- 12 TERMOACTUADOR.

Objeto/dimensión	w	l
Brazo ancho	275 μm	2 μm

Brazo angosto	75 μm	2 μm
Unión	10 μm	5 μm
Placa	200 μm	55 μm

TABLA 2 - 3 TERMOACTUADOR, DRS.

➤ Estructura tipo peine.

Esta estructura está compuesta por dos partes; la estructura principal es un puente largo con una región compuesta por cantilévers, mientras que la estructura secundaria está formada por dos masas fijas, con cantilévers anclados a ésta. La estructura tipo peine se encuentra en la Fig. 2 -13; esta estructura está diseñada con la intención de intercalar a lo largo de la longitud de la estructura completa, los cantilevers de las masas fijas y de la masa móvil, la cual esta última es la estructura principal.

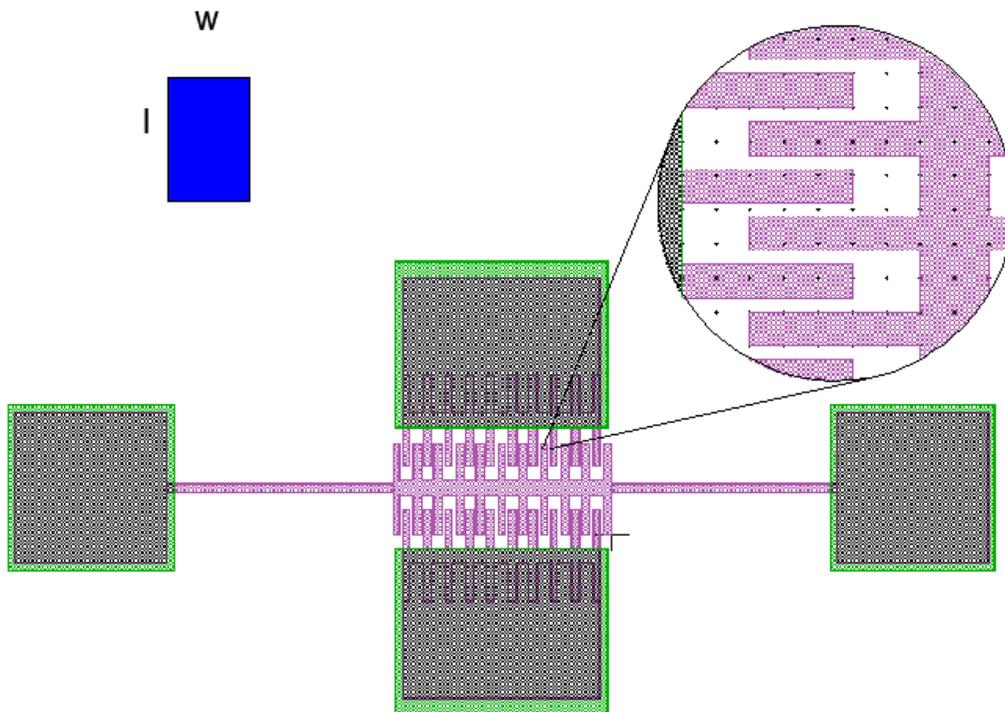


FIG. 2- 13 ESTRUCTURA TIPO PEINE, DRS.

Las masas fijas que se encuentran en la estructura contienen un total del 10 cantilévers por masa, haciendo un total de 20 cantilévers entre ambas masas fijas; la estructura móvil, cuenta con 11 cantilévers por lado, 22 cantilévers en total, hay una separación entre cantilévers de 2 μm , mientras que la separación entre cantilévers de las masas fijas es de 9 μm y la separación entre los cantilévers de la masa móvil es de 9.5 μm , en la Tabla 2 – 4, se encuentran las medidas de cada parte de la estructura.

Objeto/dimensión	w	l
Cantilevers	25 μm	5 μm
Brazos masa móvil	150 μm	5 μm
Cuerpo masa móvil	145 μm	10 μm

TABLA 2 - 4 ESTRUCTURA TIPO PEINE, DRS.

En esta estructura, tanto los cantilévers que conforman a las masas fija, como la masa móvil, cuentan con las mismas dimensiones.

➤ **Micro-pinzas.**

Las micro-pinzas que se encuentran en la Fig. 2 -14, tienen un diseño similar al microactuador que se encuentra en esta misma sección, sin embargo, esta estructura cuenta con un elemento nuevo, al cual se divide en tres secciones, los cuales se llamarán “*segmento punta A*” y “*segmento punta B*” y “*punta*”.

El funcionamiento de este dispositivo va en función de la expansión térmica de los materiales; al momento de aplicar un voltaje en las terminales de este dispositivo, éste se calienta, provocando que se expanda y la pinza se cierre. Debido a que la estructura base para este dispositivo es el termoactuador mostrado anteriormente, solo se encuentran las dimensiones de la pinza en la Tabla 2 -5.

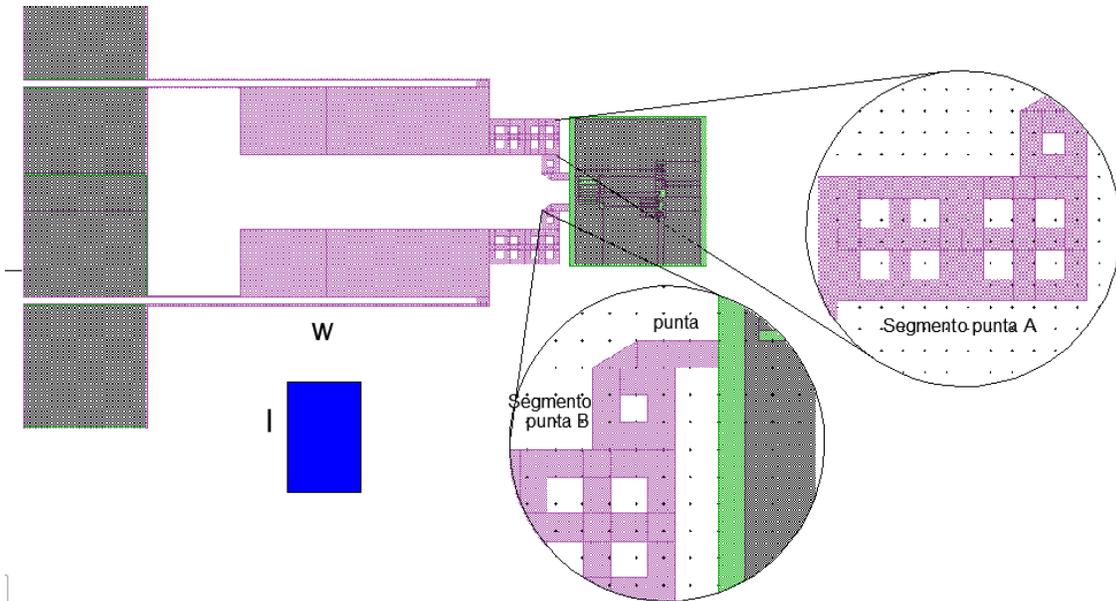


FIG. 2- 14 MICRO-PINZA, DRS.

Objeto/dimensión	Cuadro interior	Cuadro exterior	w	l
Segmento punta A	18 μm	28.5 μm	-	-
Segmento punta B	5 μm	5 μm	-	-
Punta	145 μm	10 μm	15 μm	5 μm

TABLA 2 - 5 MICRO-PINZA, DRS.

Las cavidades que se encuentra en el segmento A, son de 6.75 μm . Como ya se mencionó anteriormente, estas cavidades tienen la función de acelerar el micromaquinado.

➤ Espiral

Como última estructura diseñada en el chip DRS, se diseñó una espiral de Arquímedes. La ecuación 2.1 representa la expresión de dicha espiral; esta ecuación representa dos movimientos simultáneos, uno rectilíneo y el segundo rotacional.

$$r = a\theta \quad 2.1$$

Como se observa en la Fig. 2- 15, esta estructura tiene como centro un ancla, al igual que al final de la estructura; por la particularidad de esta estructura, puede utilizarse como resonador.

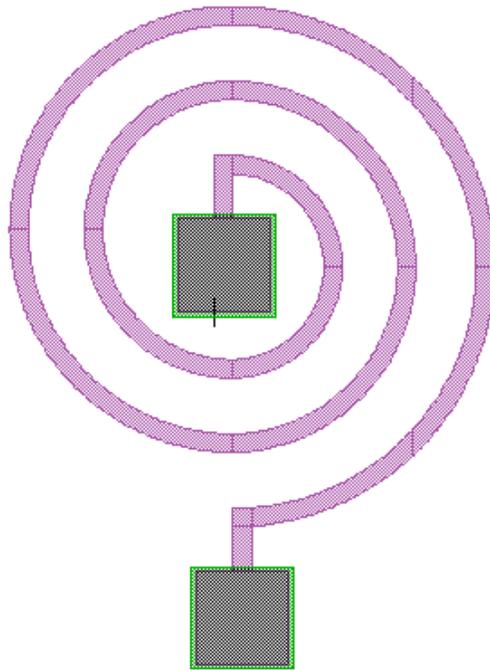


FIG. 2- 15 ESTRUCTURA TIPO ESPIRAL.

2.3 Chip C1

El chip C1 se diseñó utilizando como base el chip etiquetado como DRS, visto en el apartado anterior; en este chip se modificaron algunas estructuras para comparar los resultados de ambos chips, además se añadieron nuevas estructuras para evaluar la integridad física después de los procesos de micromaquinado. El diseño se realizó con base a las especificaciones y limitaciones de la tecnología CNMN-IPN.

Las diversas estructuras que se encuentran en este chip se clasificaron en las siguientes categorías:

- Estructuras tipo peine.
- Estructura tipo membrana.
- Estructuras tipo cantiléver y puente.
- Termoactuador.

En la Fig. 2-16 se puede observar el chip C1, este chip cuenta principalmente con cantilévers distintos al cantilever convencional (Fig. 2-8), también cuenta con puentes similares a los mostrados en el chip DRS, sin embargo, las estructuras presentes en este chip cuentan con una longitud definida y en el caso de algunos cantilévers cuentan con un centro de masa; en el caso de las membranas, solo se agregó un diseño similar, mientras que los termoactuadores sufrieron una leve variación en la medida de sus brazos, todas estas modificaciones y estructuras nuevas se verán más adelante.

Cada una de las estructuras que se encuentran en el chip C1, tienen un ancla de $110\ \mu\text{m} \times 110\ \mu\text{m}$, exentando a las anclas de las estructuras tipo peine, ya que debido a la cantidad de dedos que tiene en cada segmento, obligó a que dicho componente sea más amplio.

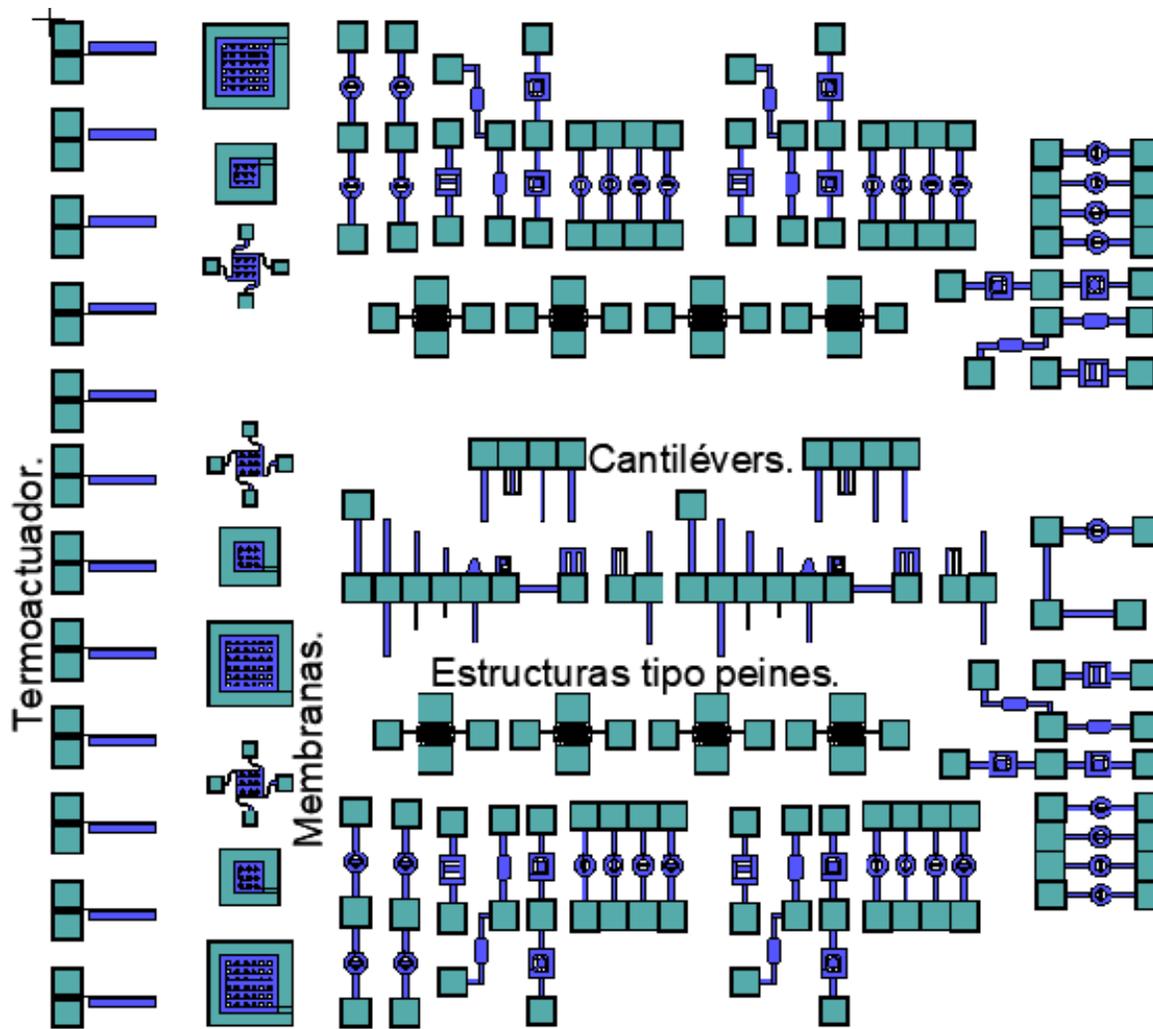


FIG. 2- 16 CHIP C1.

➤ Estructura tipo peine.

La estructura tipo peine que se encuentra en la Fig. 2- 17, se desarrolló con base a la que se encuentra en el chip DRS, sin embargo, en esta estructura los brazos que sostienen la masa con cantilévers son más cortos; la estructura central es una masa móvil, y cuenta con 22 cantilévers en total; 11 en la parte superior de la estructura y 11 en la parte inferior. La estructura completa cuenta no sólo con la masa móvil, sino que también incluye dos masas fijas, cada una de estas masas contienen 10 cantilévers; en la Tabla 2- 6 se encuentran las medidas de cada elemento que conforma la estructura.

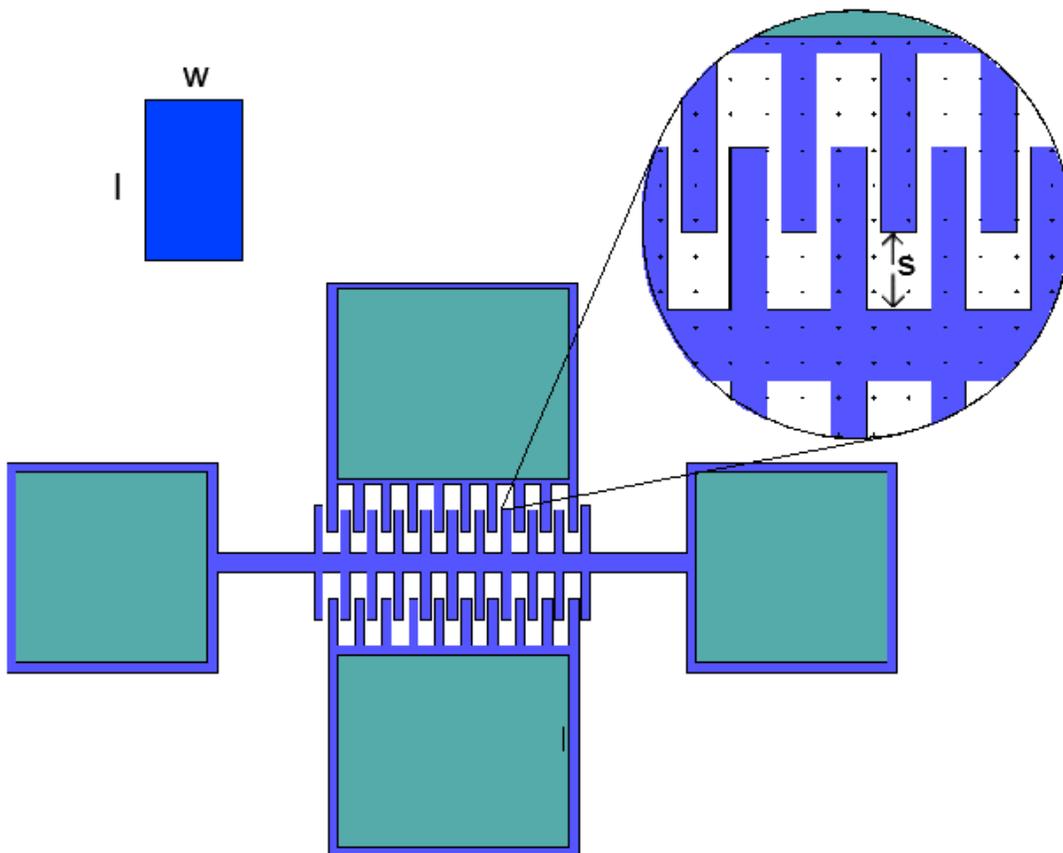


FIG. 2- 17 ESTRUCTURA TIPO PEINE, C1.

Objeto/dimensión	w	l
Cantiléver	5 μm	245 μm
Puente	25 μm	10 μm

TABLA 2 - 6 ESTRUCTURA TIPO PEINE, C1.

En la parte superior derecha de la Fig.2- 17, se encuentra una ampliación de un segmento de los cantilévares, la separación entre estas pequeñas estructuras es de 2 μm hacia los laterales, mientras que la separación “s” que se indica en la figura es de 11 μm . También se encuentra un pequeño recuadro azul en la parte superior izquierda, este rectángulo señala cuales son las dimensiones “w” y “l”; mientras que la distancia que hay entre el borde del ancla y el primer cantilever es de 50 μm .

➤ Estructura tipo Membrana.

Como se mencionó anteriormente, solo se agregaron dos membranas similares a las que se encuentran en el chip DRS, mientras que también se le hizo una modificación a una de las estructuras; en el Fig. 2- 18, se puede ver que permanecieron la membrana “M1” y la membrana “M3”, sin embargo, la membrana “M2” fue sustituida por una membrana más pequeña y con un anclaje en todo el perímetro de la misma, en la tabla 2 -7 se encuentran las dimensiones de todas las membranas.

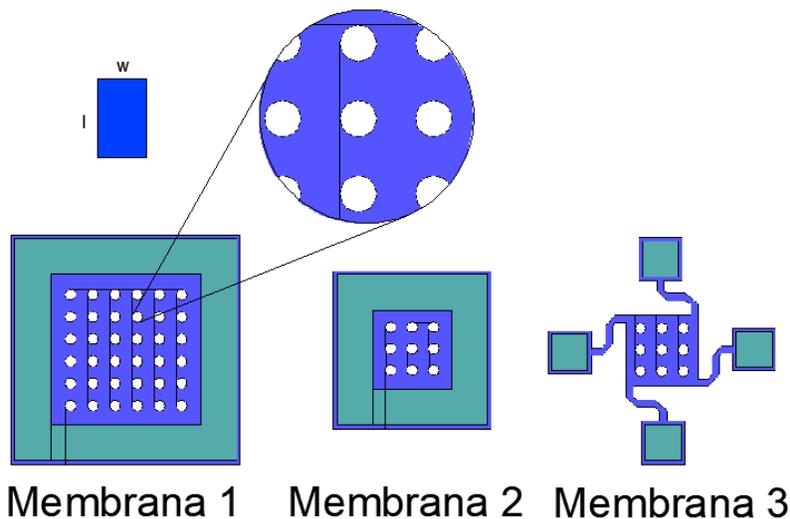


FIG. 2- 18 ESTRUCTURA TIPO MEMBRANA, C1.

Objeto/dimensión	w	l
Membrana 1	215 μm	210 μm
Membrana 2	110 μm	110 μm
Membrana 3	100 μm	100 μm

TABLA 2 - 7 ESTRUCTURA TIPO MEMBRANA, C1.

Cada membrana está hecha con una matriz de circunferencias, como se observa en la Fig. 2- 18, el radio que tiene cada circunferencia es de 7.5 μm y están separadas por 24 μm desde el centro de cada círculo; la membrana 1 contiene una matriz de ventanas circulares 6x6, mientras que las membranas 2 y 3 están hechas con una matriz de 3x3, estos orificios son utilizados para poder micromaquinar el área por debajo de la estructura, ya que si se fabrican sin estos orificios no se podría eliminar fácilmente el SiO_2 ya que las anclas cubren todo el perímetro de la estructura y el reactivo no tendría acceso al área que se quiere micromaquinar.

➤ Estructuras tipo Cantiléver y puente.

En este chip se agregaron cantilévers convencionales; las dimensiones de estos cantilévers fueron variando, tanto la “w” como la “l”; también se agregaron cantilévers menos usuales en aplicaciones, sin embargo, como éste es un trabajo dedicado a establecer una metodología de fabricación, es importante agregar estructuras inusuales para tener una base de datos más amplia y poder delimitar mejor el proceso.

En la Fig. 2- 19, se tienen 4 tipos de cantilévers distintos; los primeros son cantilévers convencionales, también se diseñó un cantilever tipo trapecio, un cantiléver tipo espiral y también cantilévers tipo “M”. En la tabla 2 - 8 se encuentran las dimensiones de cada cantilever diseñado.

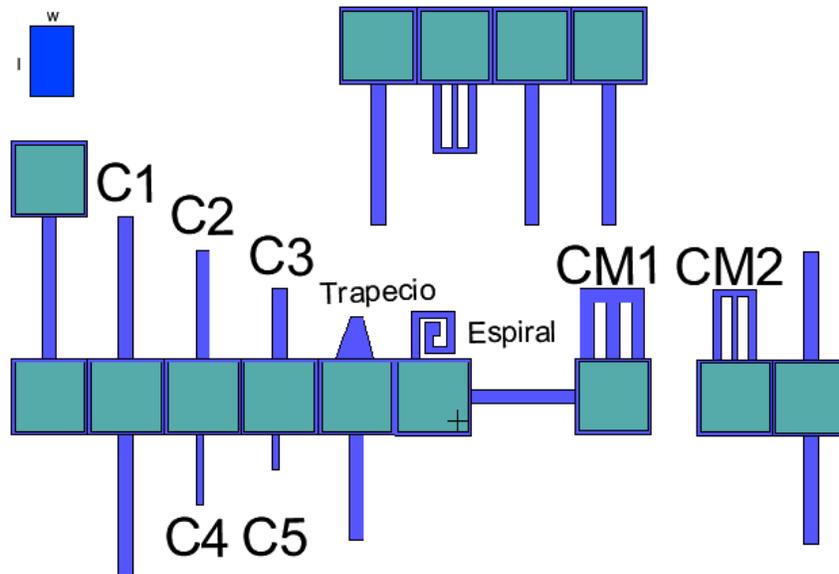


FIG. 2- 19 CANTILÉVERS, C1.

Objeto/dimensión	w	l	Base mayor	Base menor
Cantiléver 1 (C1)	20 μm	200 μm	-	-
Cantiléver 2 (C2)	20 μm	155 μm	-	-
Cantiléver 3 (C3)	20 μm	100 μm	-	-
Cantiléver 4(C4)	10 μm	100 μm	-	-
Cantiléver 5 (C5)	10 μm	50 μm	-	-
Cantiléver "CM1"	-	100 μm	20 μm	93 μm
Cantiléver "CM2"	-	100 μm	10 μm	60.5 μm
Cantiléver Espiral	-	67 μm	10 μm	60 μm
Cantiléver trapecio	-	60 μm	20 μm	53 μm

TABLA 2 - 8 CANTILÉVERS, C1.

El cantiléver espiral está basado en el trabajo de Phillip J. [14] en donde exploran la expansión térmica de un cantiléver construido por dos materiales distintos; el cantiléver al estar fabricado con distintos materiales que tienen diferente coeficiente de expansión térmica, provoca que una de las paredes soporte la diferencia térmica y la deformación, lo que da como resultado a un actuador.

El cantiléver trapezoidal fue diseñado con base al trabajo de Ashley D. [15] en el que derivan un factor de corrección simple en la ecuación de Euler (ecuación 2.2) en el cantiléver que relaciona la rigidez del cantiléver con el módulo de Young y las dimensiones del mismo.

$$k = E_c t^3 w / (4L^3) \quad (2.2)$$

Para hacer esta corrección de la constante del resorte aplican la ecuación (2.3), la cual relaciona la constante del resorte en el extremo del cantiléver y la longitud que existe entre la base y la punta del cantiléver. Cabe aclarar, que la ecuación (2.3) es una ecuación para un cantiléver convencional, pero dicha ecuación tiene una buena aproximación para este tipo de geometrías de cantilévers.

$$k_{tip} = k_{end} (L/L_{tip})^3 \quad (2.3)$$

Cabe mencionar que el objetivo de agregar este diseño no es el de corroborar que el factor de corrección deducido en el trabajo de Ashley D. es el correcto, sino el de evaluar la integridad física de la estructura en el micromaquinado, por este motivo, no se abundará más en estas ecuaciones ni en el trabajo citado.

La mayoría de los puentes diseñados en este chip se basaron en el chip DRS, las modificaciones hechas a los puentes del chip DRS fueron: brazos más cortos, modificación al centro de masa que tiene cada puente, como se puede observar en la Fig. 2- 20, algunas de estas masas son circulares y otras cuadradas, sin embargo, cada una de ellas tiene una pequeña plataforma. Los puentes que tienen una masa uniforme son estructuras basadas en el trabajo de Chang Ge [16], en el cual presentan estructuras MEMS hechas de polímeros, empleando fotorresistencia SU-8 como capa estructural.

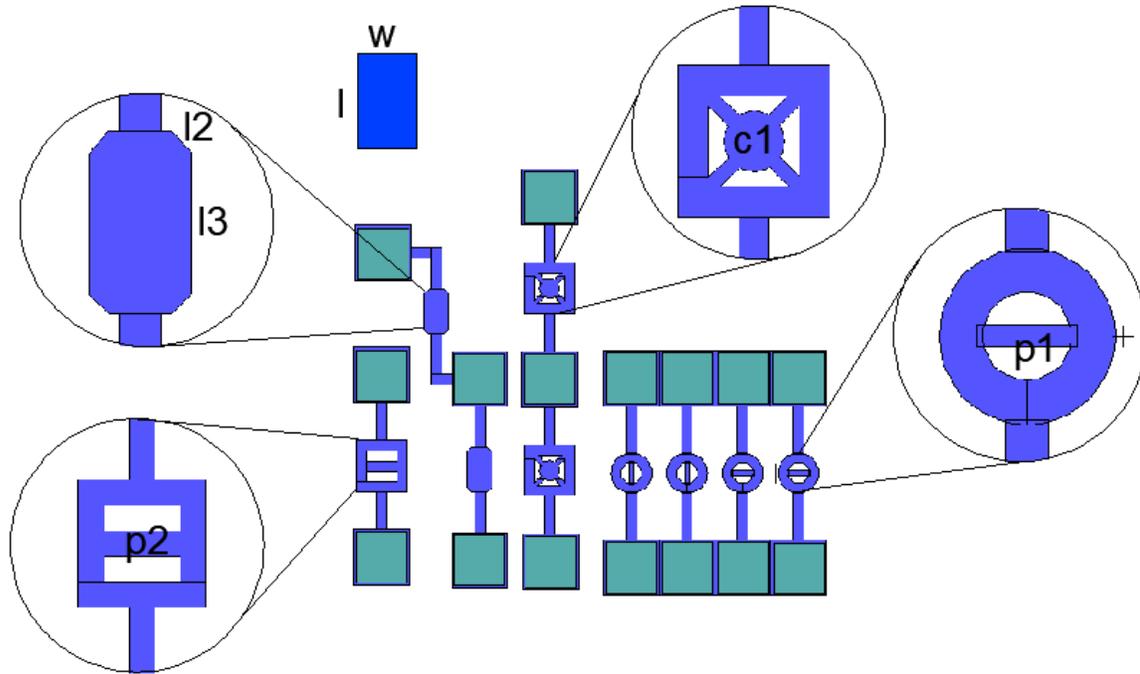


FIG. 2- 20 PUENTES, C1.

Objeto/dimensión	w	l	radio	l2	l3
Cuadrado exterior	100 μm	100 μm	-	-	-
Cuadrado interior)	60 μm	60 μm	-	-	-
Circulo exterior	-	-	40 μm	-	-
Circulo interior	-	-	20 μm	-	-
Brazos cuadrados	20 μm	75 μm	-	-	-
Brazos dona	20 μm	94.5 μm	-	-	-
Brazos Octágono	118 μm	20 μm	-	-	-
Octágono	-	-	-	14 μm	30.5 μm
Placa (p1)	39.5 μm	10.5 μm	-	-	-
Placa (p2)	60 μm	20 μm	-	-	-

TABLA 2 - 9 PUENTES, C1.

Vale la pena mencionar también, que el objetivo de cambiar la forma de las masas y la orientación de las placas que tienen los puentes circulares es para evaluar la deformación que pueden tener durante y después del proceso de micromaquinado, tratando de obtener así una masa óptima con el menor grado de deformación después de la fabricación. En la tabla 2- 9 se especifican las medidas de cada una de las masas, brazos y placas.

➤ Termoactuador.

En la Fig. 2- 21 se muestra el termoactuador que se agregó al chip C1. Este termoactuador es similar al que se encuentra en el chip DRS. Cuenta con brazos delgados, y una placa considerablemente grande con respecto a los brazos, esto puede provocar que dicha pieza colapse debido al peso o simplemente que los brazos se fracturen. Por lo tanto, el objetivo de este motivo de prueba es evaluar el comportamiento de esta estructura al hacer el micromaquinado. En la tabla 2-10, se muestran las medidas de los brazos y de la placa del termoactuador.

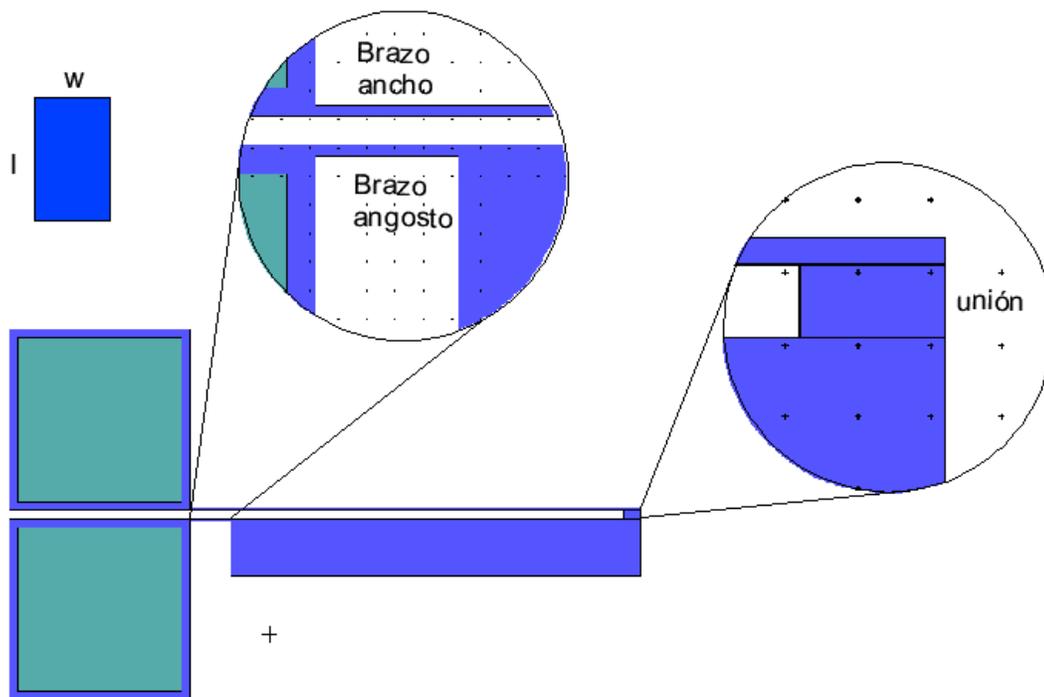


FIG. 2- 21 TERMOACTUADOR, C1.

Objeto/dimensión	w	l
Brazo ancho	275 μm	2 μm
Brazo angosto	25 μm	2 μm
Unión	10 μm	5 μm
Placa	250 μm	45 μm

TABLA 2 - 10 TERMOACTUADOR, C1.

2.4 Chip C2

El chip C2 cuenta con una gran variedad de cantilévers, así como también con algunas estructuras tipo puente, además de que se agregaron estructuras nuevas a este chip. En este caso se agregaron una serie de resortes, así como también se les agregaron estructuras similares a las membranas, pero en lugar de tener un ancla que cubra todo el perímetro, se les agregó una serie de resortes.

En la Fig. 2- 22, se encuentra el chip C2, en él se encuentran no solo las estructuras ya mencionadas, también algunas estructuras sufrieron modificaciones, como es el caso de los termoactuadores. En este chip se modificaron sus brazos, también se agregó una nueva estructura tipo peine y se modificó la estructura tipo peine que se encuentra en el chip C1. Las categorías en las cuales se distribuyeron las estructuras es la siguiente lista:

- Cantilévers y puentes.
- Estructura tipo peine.
- Membranas.
- Resortes.
- Termoactuadores.

En este chip las membranas no sufrieron ninguna modificación con respecto a las que se encuentran en el chip C1, por lo cual no se hablará a detalle en los siguientes apartados, por lo cual no habrá más información de éstas, además de la ya expuesta en el chip mencionado.

Cada estructura está anclada a un bloque de $110\ \mu\text{m} \times 110\ \mu\text{m}$, mientras que la separación mínima que tienen las estructuras es de $5\ \mu\text{m}$, esta separación mínima será explicada en cada una de las estructuras.

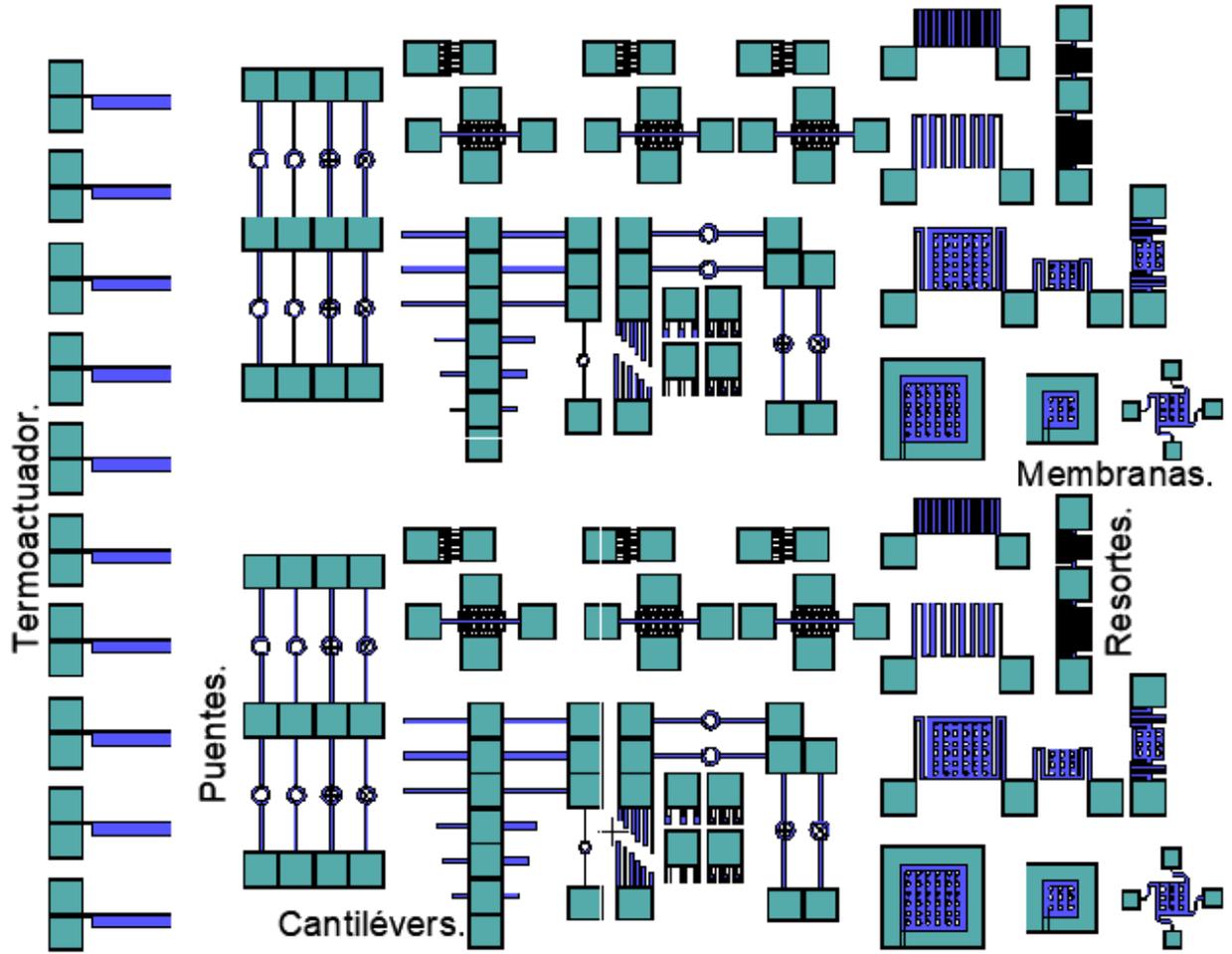


FIG. 2- 22 CHIP C2.

➤ Cantilévers.

La principal característica de los cantilévers que se encuentran en este chip, es que van reduciendo su longitud, el ancho o ambos; en la Fig. 2- 23 se encuentra el segmento del layout que corresponde a estas estructuras. En este chip se encuentran cantilévers con un ancla particular, sin embargo, también se diseñaron cantilévers que comparten anclas, estos últimos cantilévers tienen una “ w ” específica, mientras que la variable que se modifica es la “ l ”; la separación que hay entre estos cantilévers es de $5\ \mu\text{m}$.

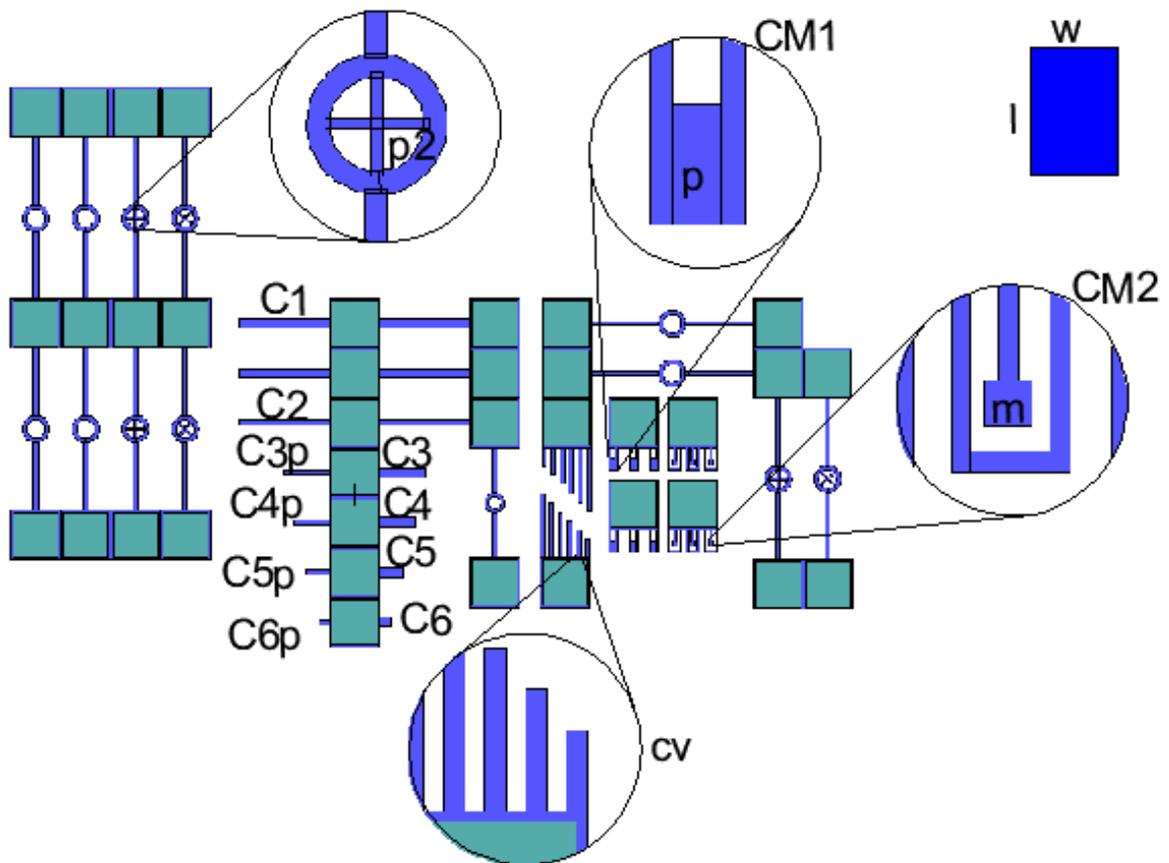


FIG. 2- 23 CANTILÉVERS Y PUENTES, C2.

En la imagen anterior se encuentran muchos cantilévers. En esta imagen se encuentran algunos de estos con su respectiva etiqueta de identificación. Sin embargo, por la cantidad de estas estructuras es difícil colocar el nombre a cada

una, como, por ejemplo, los cantilévers verticales “cv”, esta etiqueta engloba a todos los cantilevers convencionales que comparten ancla.

Otro tipo de cantiléver son los que llevan la etiqueta “CM”; el cantiléver CM1 se diseñó con el objetivo de analizar el micromaquinado a estructuras con una cavidad dentro de la misma; el cantilever CM2 tiene el mismo propósito, sin embargo, este último cuenta con una estructura dentro de la misma cavidad, ya que se necesita estudiar el micromaquinado en zonas estrechas; en la tabla 2- 11 se encuentran las dimensiones de las estructuras.

Objeto/dimensión	w	l
Cantiléver (C1)	200 μm	20 μm
Cantiléver (C2)	200 μm	10 μm
Cantiléver (C3)	100 μm	20 μm
Cantiléver (C3p)	100 μm	10 μm
Cantiléver (C4)	80 μm	20 μm
Cantiléver (C4p)	80 μm	10 μm
Cantiléver (C5)	60 μm	20 μm
Cantiléver (C5p)	60 μm	10 μm
Cantiléver (C6)	40 μm	20 μm
Cantiléver (C6p)	40 μm	10 μm
Cantiléver (cv1)	140 μm	10 μm
Cantiléver (cv2)	120 μm	10 μm
Cantiléver (cv3)	100 μm	10 μm
Cantiléver (cv4)	80 μm	10 μm
Cantiléver (cv5)	60 μm	10 μm
Cantiléver (cv6)	40 μm	10 μm
CM1	5 μm	40 μm
CM2	5 μm	50 μm
m	11.5 μm	12 μm
p	10 μm	25 μm

TABLA 2 - 11 CANTILÉVERS, C2.

En el caso de las estructuras tipo puente que se encuentran en el layout, éstas sufrieron modificación a la dimensión “l” del brazo que sostiene la masa, así como también sufrieron una pequeña modificación a la masa que tienen en el centro, como se puede observar en la *Fig. 2- 23*.

Las dimensiones que tienen estas estructuras se muestran en la tabla 2 - 12; en esta tabla solamente se encuentra la estructura “*brazo*”, “*dona*” y “*p2*”, ya que en este caso todas las estructuras tienen las mismas dimensiones. La etiqueta p2, hace referencia a la estructura que se encuentra dentro del área de la dona.

Objeto/dimensión	w	l	r1	r2
Brazo	10 μm	150 μm	-	-
Dona	-	-	20 μm	30 μm
p2	5 μm	44 μm	-	-

TABLA 2 - 12 PUENTES, C2.

➤ Estructura tipo Peine

En la Fig. 2- 24, se muestran las estructuras tipo peine; en este apartado se encuentran dos estructuras, la primera estructura es una derivación de la estructura mostraba en el chip DRS, mientras que la segunda estructura cuenta con dos masas fijas, los cantiléveres en cada una de estas masas están intercalados.

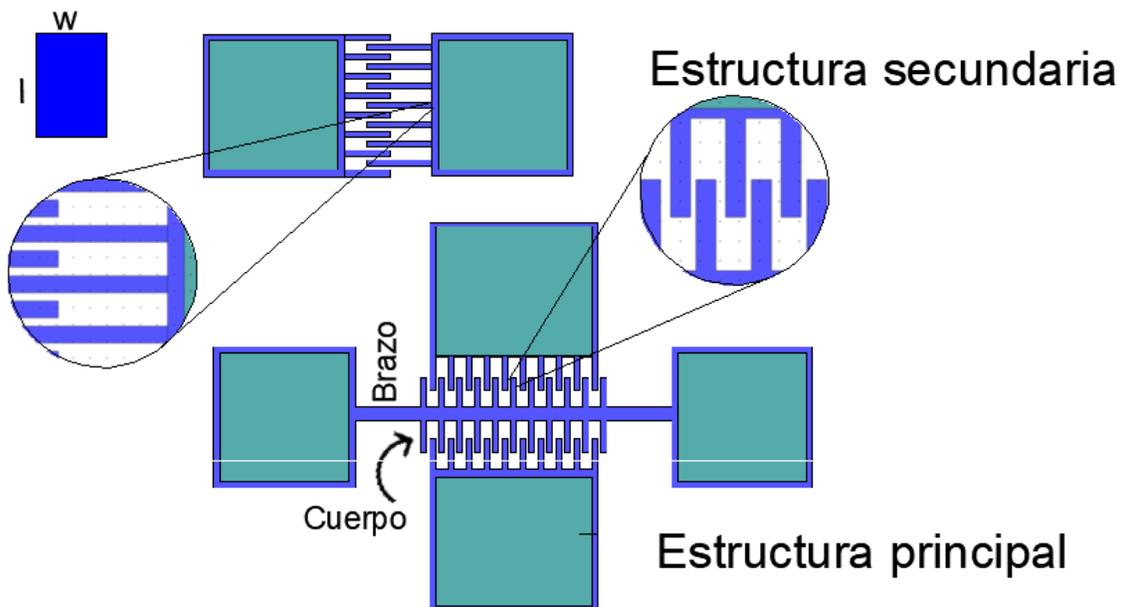


FIG. 2- 24 ESTRUCTURAS TIPO PEINE.

La estructura principal se puede segmentar en 4 elementos; el primer elemento se encuentra en la masa móvil, consistiendo éste en los brazos que sostienen la masa

en la estructura principal, estos brazos son más cortos que los que presenta la estructura tipo peine en el chip DRS. El segundo elemento es el cuerpo de la masa móvil, este elemento contiene a los cantilévers, mientras que el tercer y último elemento son los cantilévers.

Objeto/dimensión	w	l
Cantiléver	5 μm	23 μm
Brazo	50.5 μm	10 μm
Cuerpo	145 μm	10 μm

TABLA 2 - 13 ESTRUCTURA TIPO PEINE PRINCIPAL, C2.

Objeto/dimensión	w	l
Cantiléver 1	35 μm	5 μm
Cantiléver 2	50 μm	5 μm

TABLA 2 - 14 ESTRUCTURA TIPO PEINE SECUNDARIA, C2.

En la tabla 2 -13 se encuentran las dimensiones de la estructura principal; en esta estructura todos los cantilévers que se encuentran en la masa móvil y en las masas fijas, los correspondientes cantilévers cuentan con las mismas dimensiones y la misma separación entre cantilévers de la misma fila, que son 9 μm . Sin embargo, la separación que existe entre los cantilévers intercalados es de 2.5 μm del lado izquierdo y de 1.5 μm del lado derecho. Esta asimetría corresponde con el objetivo de lograr un diferencial de capacitancias en función del movimiento inercial dependiente de la dirección del acelerómetro.

Finalmente, tabla 2 – 14 especifica las dimensiones de los cantilévers de la estructura secundaria. Estos cantilévers cuentan con diferentes dimensiones, y al igual que los cantilévers que se encuentran en la estructura principal, también cuentan con una separación distinta entre cantilévers de la misma hilera, (en este caso columnas); la separación que existe entre cantilévers de la misma columna es de 10 μm , mientras que la separación entre cantilévers intercalados es de 2.5 μm .

➤ Membranas.

En esta sección se describen las membranas cuadradas; estas estructuras son una réplica de las membranas vistas en el chip C1, sin embargo, se añadieron 3 membranas con resortes, estos resortes van unidos al ancla.

El movimiento vertical de las primeras membranas se encuentra limitado, ya que éstas se encuentran ancladas en todo el perímetro, lo que reduce su movimiento. Se espera que las nuevas membranas tengan mayor movilidad en el eje z, como se muestra en la Fig. 2-26.

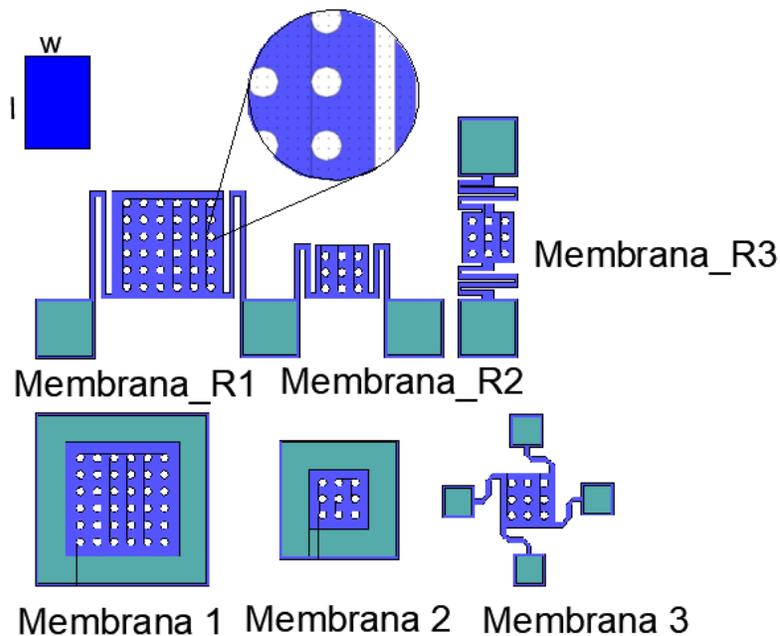


FIG. 2- 25 MEMBRANAS, C2.

Las membranas con resortes que se encuentran en la Fig. 2-25, en esencia son similares a las membranas que están ancladas por todo el perímetro; el objetivo principal de estas nuevas membranas es el de evaluar el desplazamiento que pueden llegar a tener después del micromaquinado, así como también evaluar si las estructuras se colapsan o se fracturan, ya que debido a la masa que tienen estas estructuras, es posible que los brazos, al ser demasiado largos y delgados, colapsen, en la Fig. 2-26 se encuentra la simulación de una estructura tipo membrana.

Las dimensiones de estas nuevas estructuras se encuentran en la tabla 2- 15, sin embargo, las dimensiones de las membranas 1, 2 y 3, se encuentra en la tabla 2- 18.

Objeto/dimensión	w	l	No. vueltas
Membrana_R1	206 μm	199 μm	-
Membrana_R2	96 μm	98 μm	-
Membrana_R3	96 μm	98 μm	-
Resorte R1	410 μm	10 μm	1
Resorte R2	210 μm	10 μm	1
Resorte R3	10 μm	360 μm	2

TABLA 2 - 15 MEMBRANAS CON RESORTE, C2.

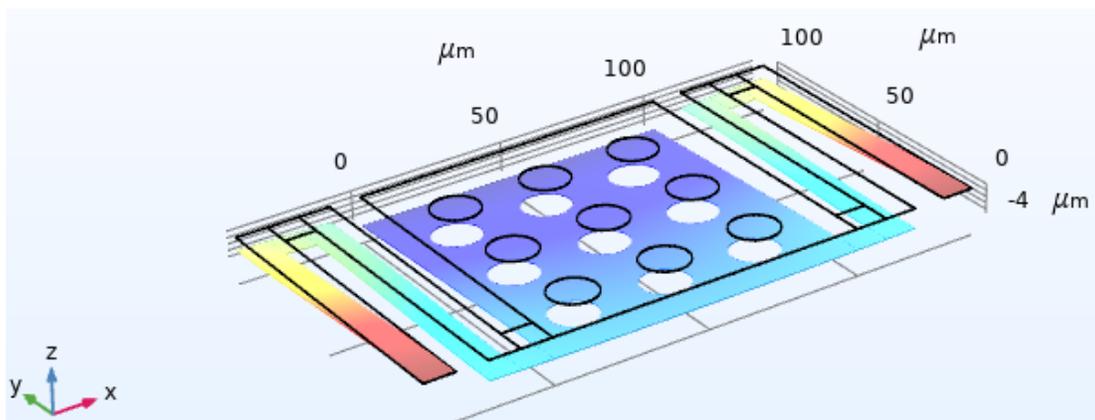


FIG. 2- 26 MEMBRANA CON DESPLAZAMIENTO EN EL EJE -Z.

➤ Resortes.

La idea principal de agregar resortes sin masa en el diseño del chip es para observar cuál es la mejor ubicación de las anclas de los mismos, como se observa en al Fig. 2 – 27. Estos resortes cuentan con distintas dimensiones, así como también distinto número de vueltas y el anclaje está posicionado en distintos lugares.

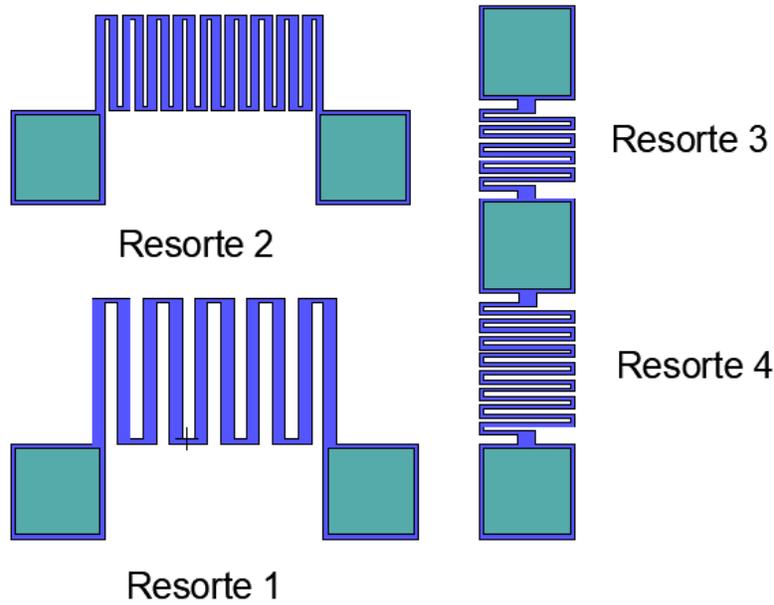


FIG. 2- 27 RESORTES, C2.

Se diseñaron 4 tipos de resortes, como se observa en la figura anterior; estos resortes se trazaron con estructura de greca, las dimensiones de cada resorte se encuentran en la tabla 2-16, en ella se establecen las dimensiones “w”, “l” y el número de vueltas que tiene cada resorte.

Objeto/dimensión	w	l	No. vueltas
Resorte 1	286 μm	170 μm	5
Resorte 2	265 μm	110 μm	9
Resorte 3	175 μm	110 μm	4
Resorte 4	115 μm	100 μm	7

TABLA 2 - 16 RESORTES, C2.

➤ Termoactuador.

El termoactuador que se encuentra en este chip es una réplica del termoactuador presentado en el chip C1, sin embargo, esta estructura sufrió pequeñas modificaciones; esta variación fue en el brazo ancho y angosto, modificando las dimensiones que estos elementos.

A pesar de que son mínimas las modificaciones hechas, éstas son significativas ya que ayuda a evitar que los brazos se rompan en el proceso de micromaquinado, así como también puede prever que la estructura colapse por el peso de la misma. En la Fig. 2- 28, se encuentra el termo actuador mencionado, mientras que las dimensiones se encuentran en la tabla 2- 17.

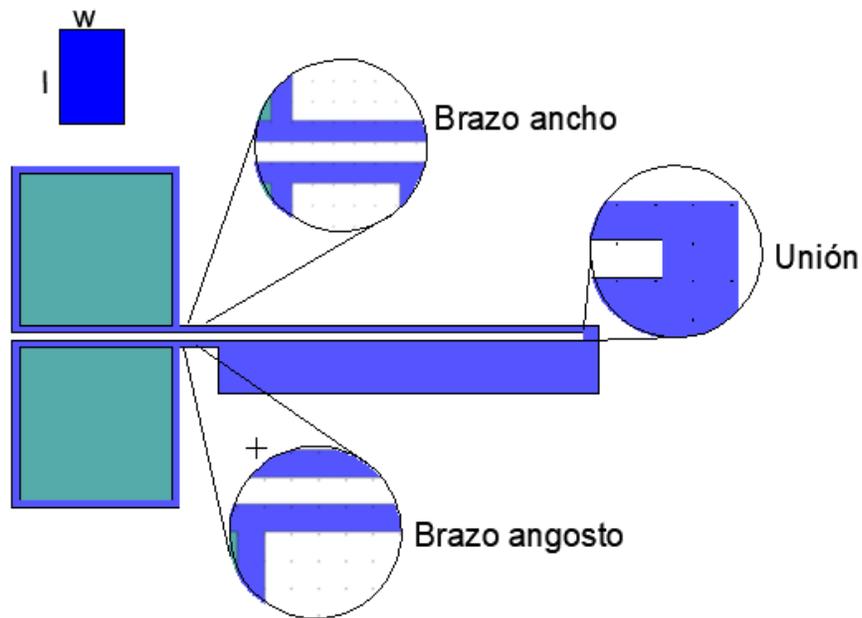


FIG. 2- 28 TERMOACTUADOR, C2.

Objeto/dimensión	w	l
Brazo ancho	275 μm	5 μm
Brazo angosto	25 μm	5 μm
Unión	10 μm	5 μm
Placa	250 μm	45 μm

TABLA 2 - 17 TERMOACTUADOR, C2.

2.5 Chip C3

El chip C3 se desarrolló modificando algunas estructuras del chip C2, particularmente los cantiléver y resortes. También se agregaron estructuras tipo membrana de diferentes dimensiones, así como también se modificaron los resortes y brazos que los sostienen.

En la Fig. 2- 29 se puede observar el layout del chip C3. A lo largo de este bloque se seccionará al chip en los distintos componentes que lo integran, así como también se especificarán las dimensiones de cada estructura.

A diferencia de los chips anteriores, el chip C3, ya no cuenta con algunas estructuras, como son los termoactuadores, las micro-pinzas, incluso ya no cuenta con la estructura tipo espiral que se encuentra en el chip DRS; este chip cuenta con estructuras considerablemente grandes en comparación con las propias del chip.

El chip C3 solamente contiene 3 tipos de estructuras, las cuales son:

- Cantilévers y puentes.
- Membranas.
- Resortes.

Para el diseño del layout del chip C3, se tomó en cuenta que las estructuras deben de tener una dimensión mínima de 5 μm , así también la separación mínima que debe de existir entre cada estructura y entre partes de la misma debe de ser de mínimo 5 μm ; cuando hay estructuras con menos de la mínima asignada corren el riesgo de no soportar el micromaquinado, de igual manera, cuando existe un espacio de separación menor al mínimo estipulado en esta sección, se corre el riesgo de no lograr un grabado adecuado, ya que la apertura es muy estrecha y por ende no hay un ataque favorable.

Considerando que la dimensión mínima para el diseño de estructuras es de 5 μm , proporciona una mayor longitud de anclaje de cada estructura, ya que, si se tiene un anclaje corto, puede provocar ruptura en algún segmento del brazo que sostiene

la estructura, incluso se puede provocar la fractura en el área donde se encuentra la unión del anclaje con el brazo.

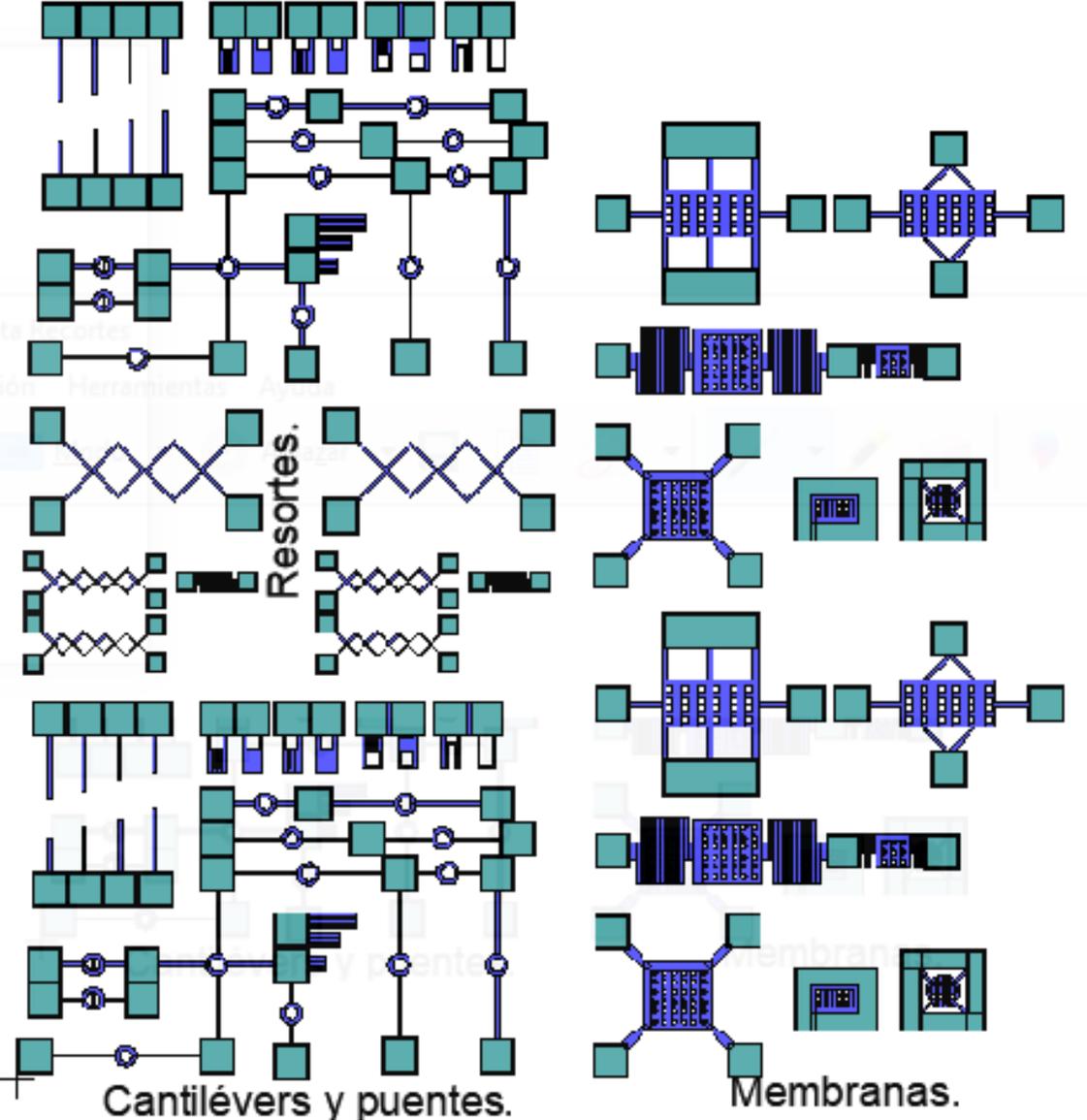


FIG. 2- 29 CHIP C3.

➤ Cantilévers y puentes.

Dentro de este bloque se encuentra una variedad de cantilévers, los cuales se agruparon en dos grupos; el primer grupo lo conforman cantilévers convencionales, mientras que el segundo grupo lo conforman cantilévers que tienen al menos una cavidad en el diseño.

En la Fig. 2- 30 se encuentra el primer grupo de estas estructuras, en ella se encuentran cantilévers convencionales o básicos; se observa que algunos de estos cantilévers comparten ancla, mientras que otros tienen un ancla individual. En este grupo se encuentran 9 cantilévers distintos: los cantilévers CV1 – CV4, comparten la característica de una dimensión “ w ” similar. Sin embargo, la variable en estos cantilévers está en la dimensión “ l ”, mientras que en los cantilévers que llevan la etiqueta CH, primero se varía la longitud “ l ”, y posteriormente la longitud “ w ”; las dimensiones de cada cantiléver se encuentran en la tabla 2 -18.

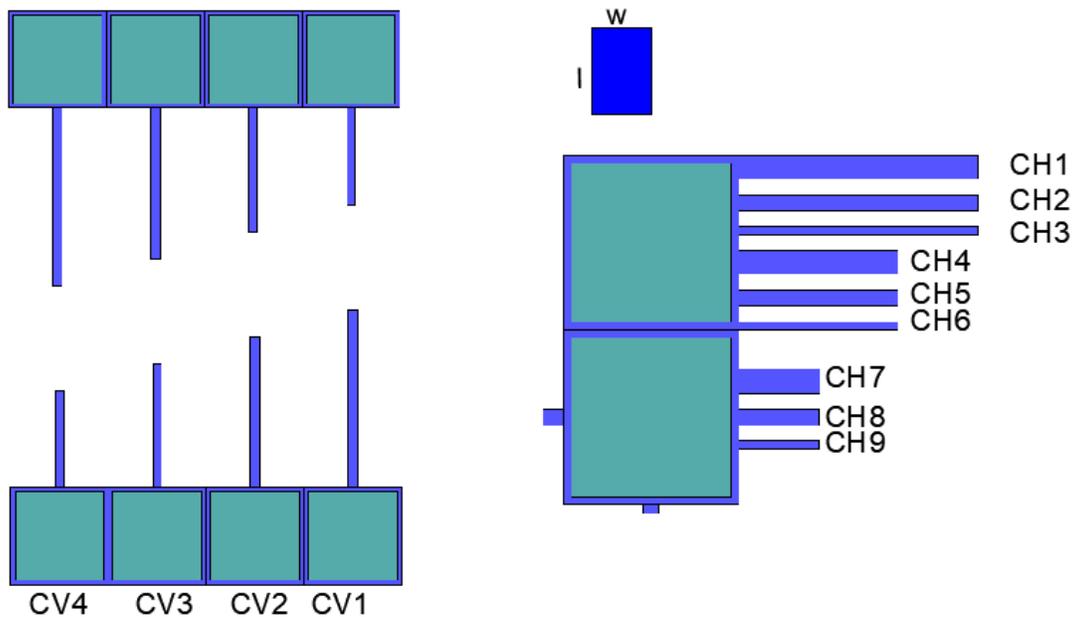


FIG. 2- 30 GRUPO 1 - CANTILÉVERS, C3.

Objeto/dimensión	w	l
CV1	10 μm	200 μm
CV2	10 μm	170 μm
CV3	10 μm	140 μm
CV4	10 μm	110 μm
CH1	150 μm	15 μm
CH2	150 μm	10 μm
CH3	150 μm	5 μm
CH4	100 μm	15 μm
CH5	100 μm	10 μm
CH6	100 μm	5 μm
CH7	50 μm	15 μm
CH8	50 μm	10 μm
CH9	50 μm	5 μm

TABLA 2 - 18 GRUPO 1 - CANTILÉVERS, C2.

Los cantilévers que se encuentran en el grupo 2 se presentan en la Fig. 2 -31, estos cantilévers tienen una o más cavidades. Algunos de estos cantilévers presentan una matriz de cavidades, como es el caso del CG2-1 y el CG2-3; debido al diseño de cada cantiléver, en la tabla 2 -19 se presentan las dimensiones del cantiléver (sin cavidades) y las dimensiones de cada una de éstas.

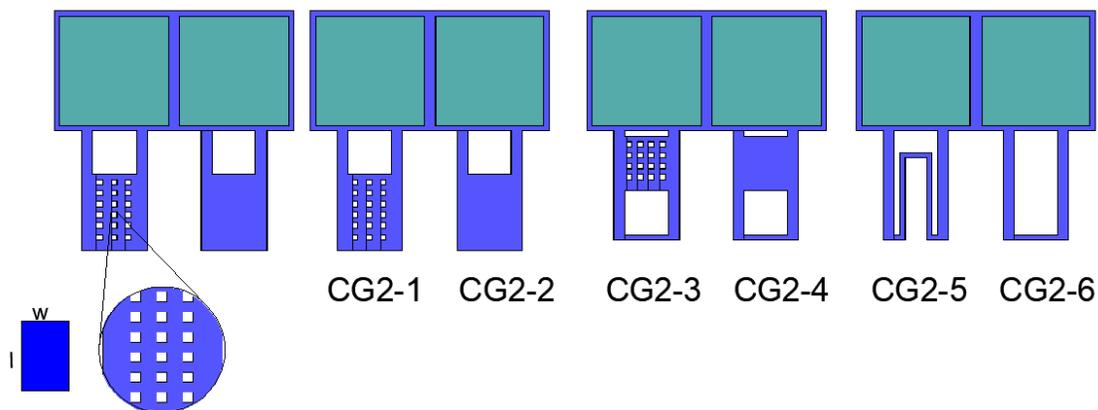


FIG. 2- 31 GRUPO 2- CANTILÉVERS, C3.

El caso del cantiléver CG2-1 y CG2-3, éstos presentan una matriz de distinto tamaño; el primer cantiléver presenta una matriz de ventanas de micromaquinado de 3x6, mientras que el siguiente cantiléver mencionado es una matriz de 4x4; debido a que ambas estructuras presentan una matriz, y la cavidad de éstas es de

las mismas dimensiones, en la tabla 2 -19, solamente se presenta la cavidad de mayor tamaño, mientras que la medida de cada cavidad de la matriz se presenta como “*cavidad matriz*”. El objeto llamado “*Cavidad grande*”, hace referencia a las dimensiones de la cavidad del cantiléver CG2-1,2,3,4, mientras que la cavidad pequeña del chip CG2-3, que se encuentra debajo de la matriz y del chip CG2-4, se presenta como “Cavidad pequeña”.

Objeto/dimensión	w	l
Cantiléver	60 μm	100 μm
Cavidad grande	40 μm	40 μm
Cavidad pequeña	40 μm	5 μm
Cavidad interna 1	40 μm	20 μm
Cavidad interna 2	5 μm	75 μm
Cavidad externa	20 μm	75
Cavidad CG2-6	40 μm	95 μm

TABLA 2 - 19 GRUPOS 2 - CANTILÉVERS, C2.

En el caso de la estructura CG2-5, se optó por dividir la cavidad que se encuentra dentro del cantiléver en dos partes, “*Cavidad interna 1 y 2*”; la primera representa el rectángulo horizontal, mientras que la segunda cavidad representa el “*claro*” vertical dentro de la figura. La “*cavidad externa*” forma el surco en el chip mencionado.

Los puentes que se encuentran en sección (Fig. 2- 32) son similares a los que se han visto en los chips anteriores, sin embargo, dentro de estas estructuras, solo se encuentran solamente brazos cortos, medianos y largos, mientras que la masa que se encuentra en estas estructuras son de las mismas dimensiones. Algunos de estos puentes cuentan con una pequeña lámina dentro de las masas; en la tabla 2 -20, se encuentran las dimensiones de los brazos, el diámetro de las masas y las dimensiones de estas pequeñas láminas.

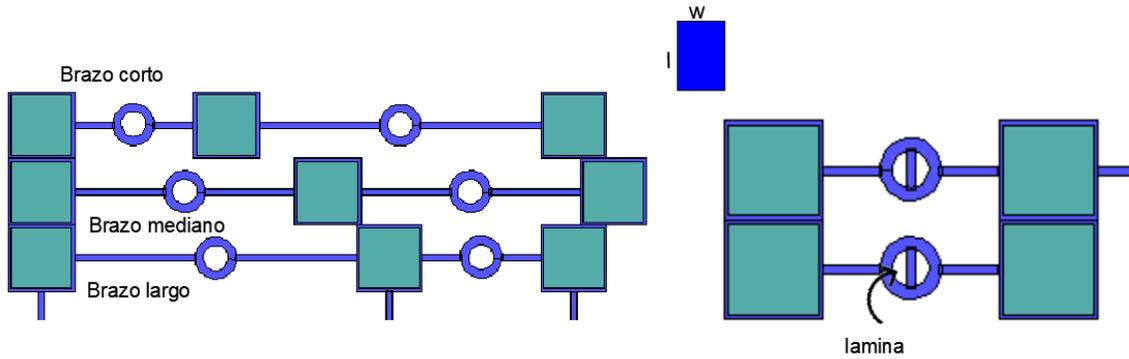


FIG. 2- 32 PUENTES, C3.

Objeto/dimensión	w	l	r1	r2
Brazo corto	65.5 μm	10 μm	-	-
Brazo mediano	150 μm	10 μm	-	-
Brazo largo	200 μm	10 μm	-	-
Lamina	10 μm	45.5 μm	-	-
Masa	-	-	20.5 μm	34,5 μm

TABLA 2 - 20 PUENTES, C2.

En el caso de los puentes que tienen la lámina en el centro de la masa, éstos solamente cuentan con brazos cortos. También se puede observar que, en este chip, hay estructuras tipo puente con 4 brazos; se realizó de esta manera para aprovechar algunas anclas.

➤ Membranas.

Estas estructuras se dividieron en 3 grupos: en la Fig. 2 – 33 se muestran estructuras tipo membrana, algunas de estas estructuras se diseñaron con base al trabajo de Kazmi [17], en el cual desarrollan estructuras que funcionen como resonadores; en este trabajo se diseña una membrana (en forma de cuadro), que se encuentra suspendido y sostenido por cuatro brazos, lo cual provoca que este dispositivo tenga una cierta resonancia a ciertas frecuencias, sin embargo, debido a que el resonador ofrece alta resistencia al movimiento en serie, esto conlleva a pérdidas de inserción.

Cabe aclarar, que el objetivo de este trabajo no es el de verificar la funcionalidad de la estructura propuesta por Kazmi, sino el de obtener un proceso de micromaquinado óptimo; la utilidad de usar la estructura es la de analizar el micromaquinado que se le hace a la misma.

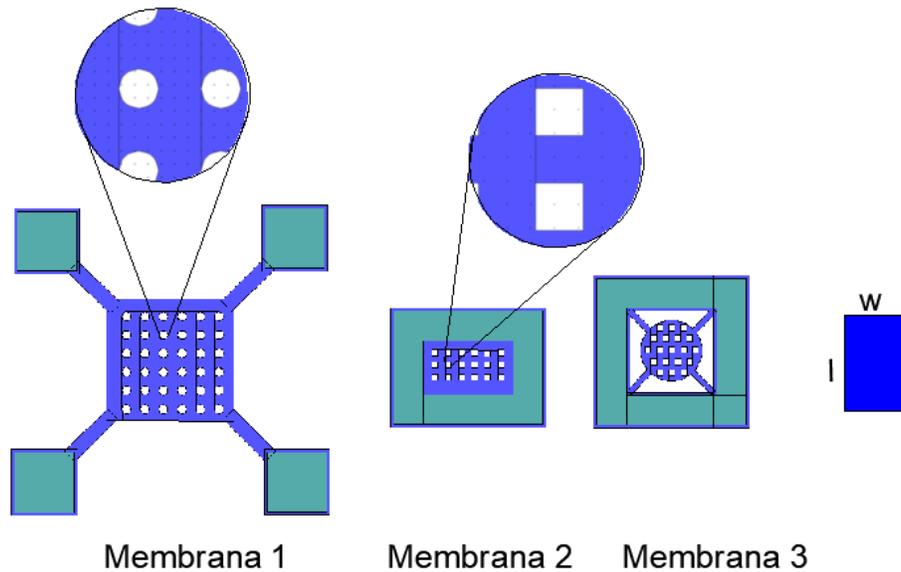


FIG. 2- 33 GRUPO 1 - MEMBRANAS, C3.

El grupo 1 se diseñó con 3 tipos de membrana; la membrana 1 es una membrana cuadrada, sujeta por 4 brazos, uno en cada arista, mientras que la membrana 2, es una membrana rectangular anclada por todo el perímetro de la misma, esta estructura cuenta con una matriz de 6x3 cavidades. La tercera membrana es una membrana circular, anclada en 4 puntos. Esta estructura cuenta con 5 filas de cavidades, sin embargo, cada fila contiene un número distinto de huecos, los huecos que tienen las membranas 2 y 3, son cavidades cuadradas, las cuales tienen las mismas dimensiones. Las dimensiones de estas estructuras se encuentran en la tabla 2 -21.

Objeto/dimensión	w	l	r
Membrana 1	213 μm	205 μm	-
Brazo membrana 1	25 μm	100 μm	-
Membrana 2	260 μm	200 μm	-

Membrana 3	-	-	50 μm
Brazo membrana 3	10 μm	50 μm	-
Cavidad membrana 1	-	-	7.5 μm
Cavidad membrana 2-3	5 μm	5 μm	-

TABLA 2 - 21 GRUPO 1, MEMBRANAS, C3.

El grupo 2 está formado solamente por 2 estructuras, estas membranas están sujetas a un par de brazos. Estos brazos funcionan como resortes; estas estructuras se encuentran en la Fig. 2- 34, mientras que las dimensiones se localizan en la tabla 2- 22.

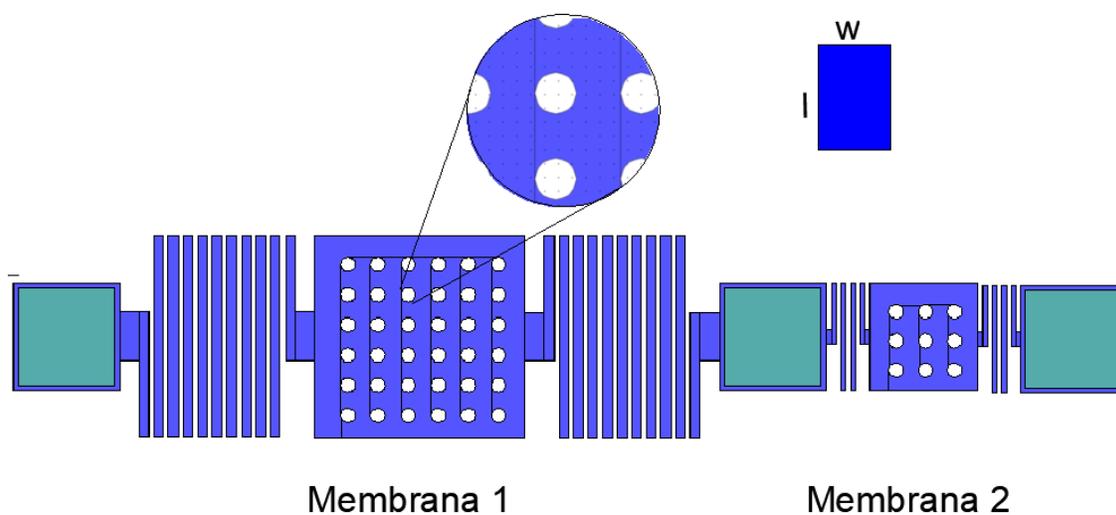


FIG. 2- 34 GRUPO 2 - MEMBRANAS, C3.

Objeto/dimensión	w	l	r
Membrana 1	213 μm	205 μm	-
Brazo membrana 1	10 μm	200 μm	-
Membrana 2	110.5 μm	110 μm	-
Brazo membrana 2	10 μm	110 μm	-
Cavidad	-	-	7.5 μm

TABLA 2 - 22 GRUPO 2 - MEMBRANAS, C3.

La membrana 1 del grupo dos contiene una matriz de cavidades de $6 \mu\text{m}$, mientras que la membrana 2 de este mismo grupo solamente tiene una matriz de 3×3 cavidades, claro, esto es debido por la diferencia de dimensiones entre una y otra.

El último grupo lo conforman 2 membranas; las estructuras diseñadas en este grupo son rectangulares, con una serie distinta de brazos, estas estructuras se encuentran en la Fig. 2 -35, mientras que sus dimensiones se encuentran en la tabla 2- 23.

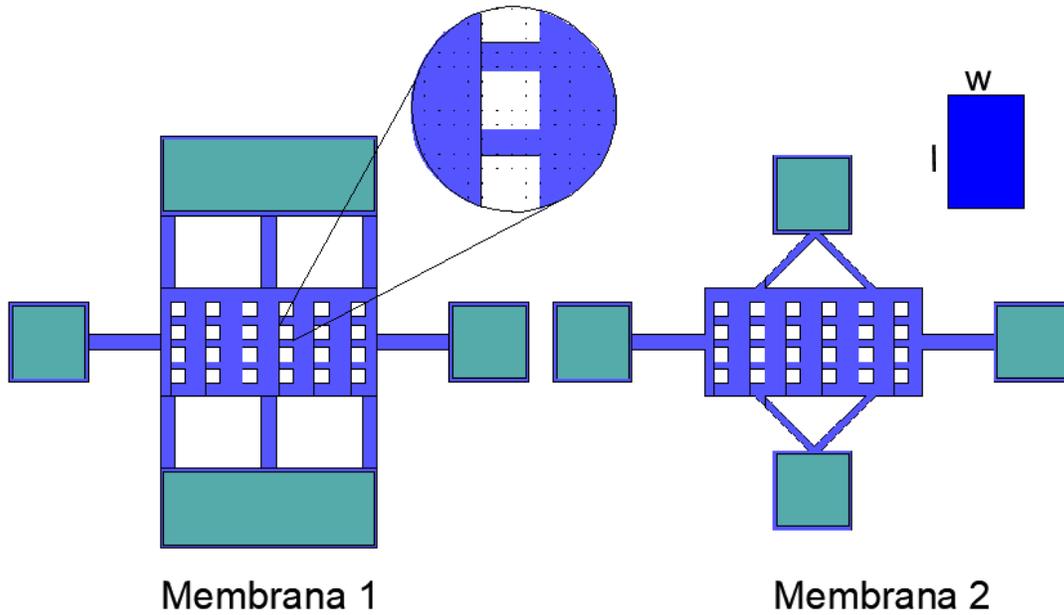


FIG. 2- 35 GRUPO 3 - MEMBRANAS, C3.

Objeto/dimensión	w	l
Membrana 1	$300 \mu\text{m}$	$150 \mu\text{m}$
Brazo membrana 1	$20 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$
Membrana 2	$300 \mu\text{m}$	$150 \mu\text{m}$
Brazo 1 membrana 2	$100 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$
Brazo 2 membrana 2	$10 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$
Cavidad	$20 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$

TABLA 2 - 23 GRUPO 3 - MEMBRANAS, C3.

➤ Resortes.

La última estructura diseñada dentro de este chip fueron resortes. Este tipo de resortes son poco convencionales por su forma de zigzag; estas estructuras se encuentran en le Fig. 2 -36, mientras que las dimensiones están en la tabla 2 -24.

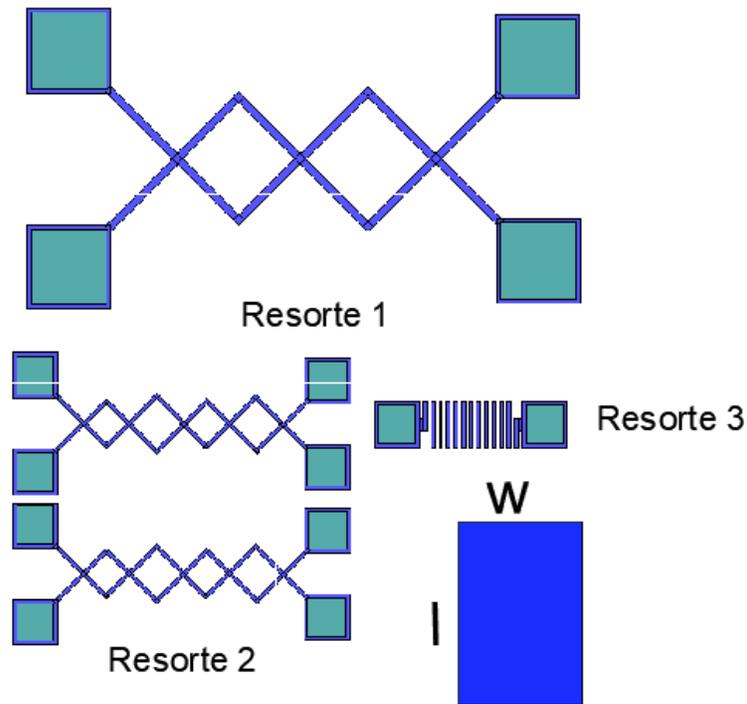


FIG. 2- 36 RESORTES, C3.

El bloque de resortes consta de 4 estructuras en total; el resorte 1 y 2 son similares, sin embargo, las dimensiones del resorte 1 son más grandes que las presentes en el resorte 2; el resorte 3 es una estructura similar a las que se encuentran en las membranas.

Objeto/dimensión	w	l	Inclinación
Resorte 1	250µm	10 µm	45°
Resorte 2	98 µm	5 µm	45°
Resorte 3	135 µm	5 µm	-

TABLA 2 - 24 RESORTES, C3.

2.6 Chip C4.

El chip C4 cuenta con una variedad de estructuras, en este chip se optó por diseños más elaborados, dicho chip se encuentra en la Fig. 2- 37. Este chip contiene una gran variedad de estructuras, por ello, se clasificaron en los siguientes bloques:

- Cantilévers.
- Estructuras tipo peine.
- Membranas.
- Resortes.

A grandes rasgos, se observa que el chip C4 cuenta con estructuras de gran tamaño en comparación con las estructuras de los chips anteriores; sin embargo, debido a su gran tamaño, reduce el número de estructuras que hay en este chip. Algunas estructuras fueron basadas en resonadores y sensores, de los cuales se hablarán brevemente más adelante.

Las dimensiones con las cuales fueron diseñadas estas estructuras se definieron con la intención de evaluar la integridad de las estructuras cuando se tiene una masa “grande”, ya que como se mencionó anteriormente, las estructuras diseñadas son relativamente pequeñas; sin embargo, también se necesitan definir estructuras que cubran una mayor área, para verificar si el micromaquinado se llega a realizar de manera satisfactoria en estas estructuras.

Las estructuras que se encuentran en los chips anteriores presentan una masa con orificios, lo cual ayuda a el micromaquinado de la estructura, debido a que el ataque no es solamente por el costado de la estructura, sino que también por los orificios, en cambio, las masas que se encuentran en este chip no cuentan con alguna brecha que facilite el micromaquinado por debajo de la masa.

Este último chip cuenta con dos reglas de diseño; la primera regla es que ninguna estructura debe de tener una dimensión menor a 5 μm , la segunda regla es que la

distancia mínima que debe de existir entre segmentos de la misma estructura debe de ser de 5 μm , este último punto quedará ejemplificado más adelante.

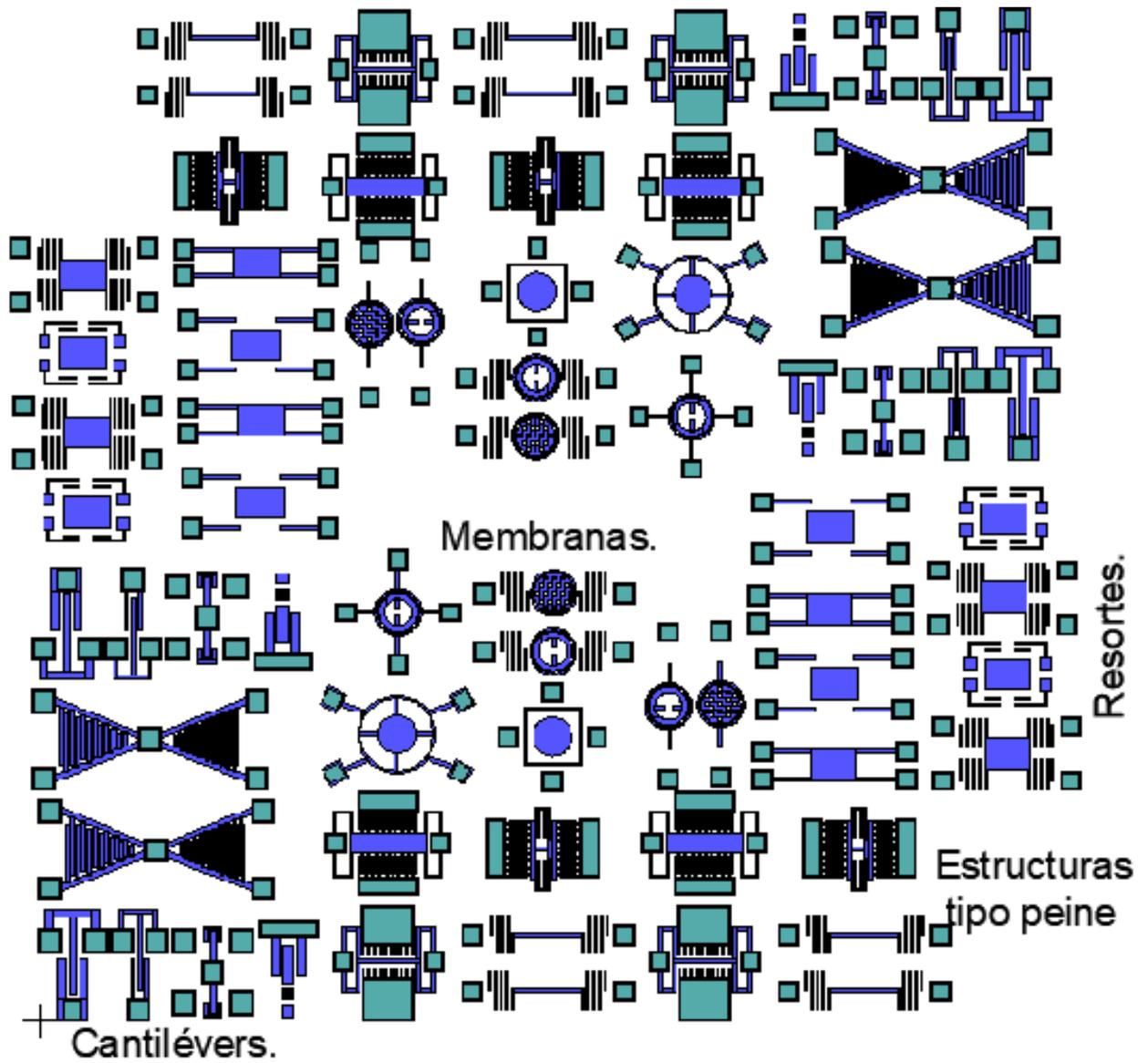


FIG. 2- 37 CHIP C4.

➤ Cantilévers.

En la Fig. 2- 38 se encuentran los cantilévers diseñados en el chip C4, los primeros cantiléver se desarrollaron con base a la estructura hecha por Pallay [18], en el cual se presenta un resonador MEMS utilizando un resorte “*crab-leg*” o “*pinza de cangrejo*”; este resorte se encuentra en la parte fija del cantiléver. Debido a la particularidad de esta estructura, se espera que logre amplitudes más altas a voltajes más bajos, ya que esta estructura permite reducir el voltaje de umbral del resonador, mientras mantiene una amplitud de vibración alta.

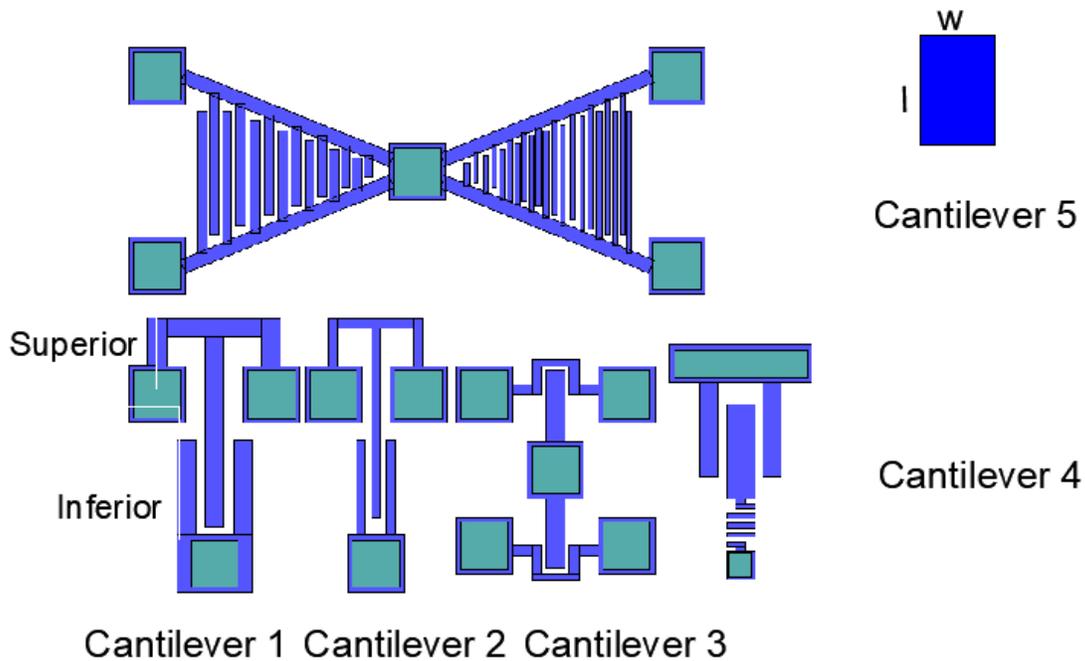


FIG. 2- 38 CANTILEVERS, C4.

Se observa en la Fig. 2-38, que las primeras tres estructuras comparten similitudes, ya que estas estructuras se conforman con el diseño de resortes ya mencionado, mientras que el cantiléver 4 presenta una estructura similar. Sin embargo, esta estructura cuenta con un resorte distinto comparado con las otras tres propuestas. Este último tipo de resorte ya se ha visto en estructuras de chips anteriores. El cantilever 5 cuenta con 4 estructuras tipo puente, mientras que cada una de estas estructuras contiene cantilévers.

Los puentes que se encuentran en el cantilever 5, cuentan con una serie de pequeños cantilévers, los cuales se encuentran en la parte izquierda del centro de la estructura, y cuentan con una dimensión “w” similar en todos ellos (ver Fig. 2 - 38). En el caso de los cantilévers que se encuentran en el lado opuesto, tiene un “w” más angosta.

Las dimensiones de las estructuras que se encuentran en la Fig. 2 -38, se encuentran en la tabla 2 – 25, sin embargo, las dimensiones de los cantilévers que se encuentran en el cantilever 5 no se presentan, solamente se encuentran las dimensiones de los puentes.

Objeto/dimensión	w	l	No. de vueltas
Cantiléver 1 Superior	20 μm	200 μm	-
Cantiléver 1 Inferior	20 μm	100 μm	-
Resorte cantiléver 1	140 μm	50 μm	1
Cantiléver 2 Superior	10 μm	200 μm	-
Cantiléver 2 Inferior	10 μm	100 μm	-
Resorte cantiléver 2	100 μm	50 μm	1
Cantiléver 3	20 μm	75 μm	-
Resorte cantiléver 3	90 μm	36.5 μm	1
Cantiléver 4 Superior	20 μm	100 μm	-
Cantiléver 4 Inferior	30 μm	55 μm	-
Resorte cantiléver 4	30 μm	55 μm	2
Puente	238 μm	15 μm	-

TABLA 2 - 25 CANTILÉVERS, C4.

➤ Estructura tipo peine.

En la Fig. 2 – 39 se muestran las estructuras tipo peine; este bloque contiene 5 estructuras, entre las cuales se encuentran 3 tipos de resortes distintos. Además, cada una de estas estructuras tiene una masa sujeta al resorte, mientras que solamente 3 de las 5 estructuras cuentan con una parte inmóvil.

Las estructuras 1,3 y 5 se dividen en dos partes: la primera parte de esta estructura la forma la masa, el resorte y los cantilévers que se encuentran en la masa, este bloque es la parte móvil de la estructura, mientras que los cantilévers que se

encuentran anclados a una masa fija es el segundo bloque que conforma a la estructura completa.

Las estructuras 1 y 3 se diseñaron con base al trabajo de Perello [19], en el que investigan a fondo el impacto que tiene un resonador MEMS debido a un fluido gaseoso y en el demuestran que la acción del flujo de corriente del gas modifica la resonancia del dispositivo; también se diseñaron con base en el trabajo de Bargiel [20,21,22], el cual está dirigido al diseño, fabricación, caracterización y simulación de microsistemas.

La estructura 4 está basada en el trabajo de Bandaru [23], en el cual se analiza el problema de optimización en un resonador MEMS; y en el trabajo de Kulkarni [24], en el cual proponen un algoritmo genético multiobjeto (*Multi Objective Genetic Algorithm, MOGA*), para implementar una síntesis automatizada en un micro resonador.

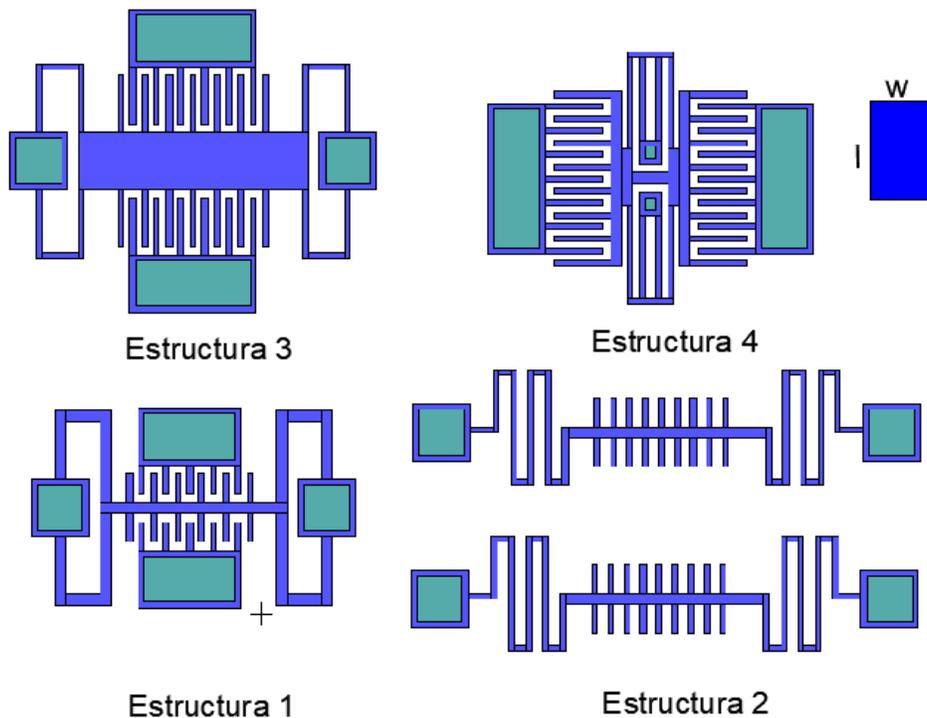


FIG. 2- 39 ESTRUCTURA TIPO PEINE, C4.

Los cantilévrs que se encuentran en la estructura 1, tienen la misma medida que los cantilévrs del estructura 2, mientras que los cantilevers de las estructuras 3 y 4 tienen las mismas dimensiones. En la tabla 2 – 26 se desglosan las dimensiones de las primeras tres estructuras, mientras que la estructura 4 se encuentra seccionado en la Fig. 2 -40, y en la tabla 2 – 27, debido a la complejidad de la estructura.

Objeto/dimensión	w	l	No. de vueltas
Cantiléver estructura 1	5 μm	25 μm	-
Resorte estructura 1	10 μm	170 μm	1
Masa estructura 1	163	10 μm	-
Cantiléver estructura 2	5 μm	25 μm	-
Resorte estructura 2	5 μm	200 μm	2
Masa estructura 2	173 μm	10 μm	-
Cantiléver estructura 3	5 μm	50 μm	-
Resorte estructura 3	5 μm	192 μm	1
Masa estructura 3	200 μm	50 μm	-

TABLA 2 - 26 ESTRUCTURA TIPO PEINE, C4.

En la tabla 2 – 26, no se encuentran divididos por bloques, sino por elementos, esto debido a que es más práctico denotar los elementos a los que hace referencia, y por el hecho de que los cantilevers de la misma estructura son todos del mismo tamaño.

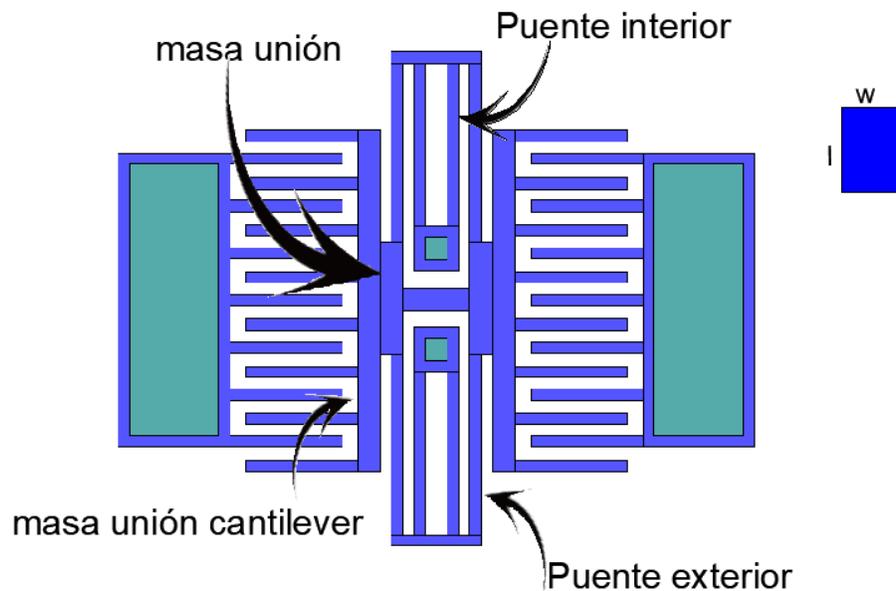


FIG. 2- 40 ESTRUCTURA 4 - TIPO PEINE, C4.

La estructura 4 se dividió en dos bloques: el bloque móvil y el bloque inmóvil. El bloque inmóvil solamente está constituido de cantilévers, mientras que el bloque móvil se encuentra conformado por cantilévers y masa; la masa se divide en 4 secciones, como se observa en la Fig. 2 -40.

Objeto/dimensión	w	l
Cantilévers	50 μm	5 μm
Masa unión	10 μm	50 μm
Masa unión cantiléver	10 μm	152 μm
Puente interior	5 μm	72 μm
Puente exterior	5 μm	80 μm

TABLA 2 - 27 ESTRUCTURA 4 - TIPO PEINE, C4.

Los puentes interiores están sujetos al ancla que se encuentra dentro de la estructura; esta ancla es de un área pequeña, pero se espera que debido a las tensiones que se generan en la estructura, esta se mantenga estable y no se colapse por el peso de la misma.

➤ Membranas.

Las estructuras tipo membrana que se diseñaron en este chip tienen una masa circular, algunas de estas estructuras están unidas por brazos, mientras que otras cuentan con resortes que sustituyen los brazos. En la Fig. 2 -41, se pueden ver estas estructuras.

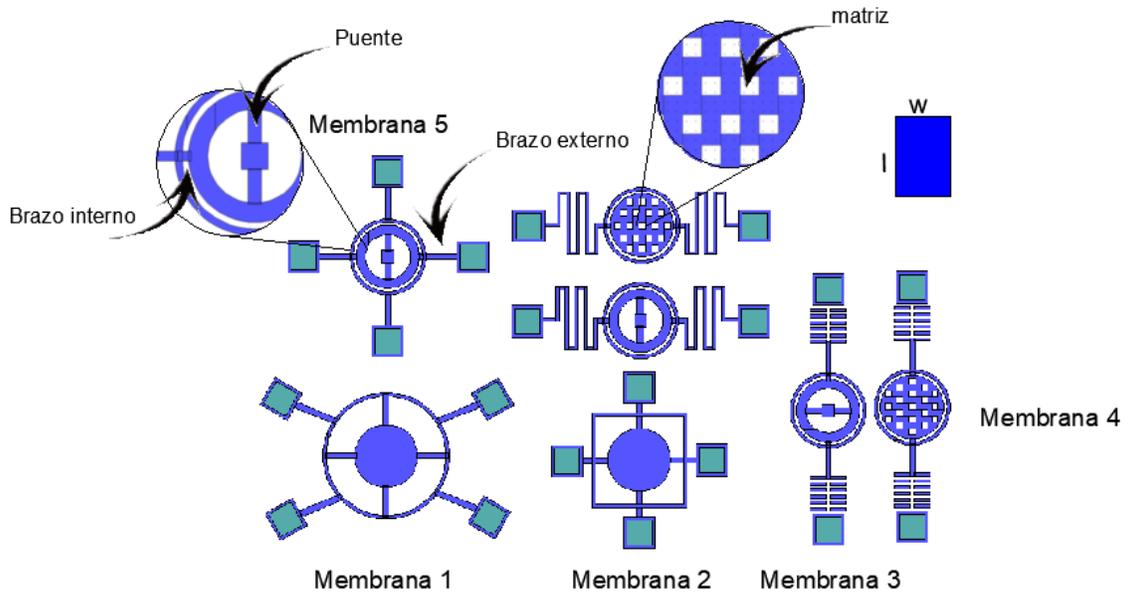


FIG. 2- 41 MEMBRANAS, C4.

Las estructuras tipo membrana que se presentan en la Fig. 2 -41 y se pueden clasificar en tres grupos. Estos grupos se ordenan de acuerdo al centro de masa, la cual podríamos decir que es la característica singular de cada estructura; la clasificación es la siguiente:

- ❖ Masa completa.
- ❖ Masa con puente.
- ❖ Masa con matriz.

Las membranas 1 y 2 entran en la clasificación de masa completa, ya que la masa que se encuentra en el centro de cada una de estas estructuras no tiene ninguna cavidad. Las membranas con puente son aquellas que presentan una cavidad extensa dentro de la masa central y en el centro de esta estructura se encuentra un puente que une ambos extremos de la circunferencia, la membrana 3 corresponde a esta clasificación. La membrana 4 se encuentra dentro de las masas con matriz, debido a que esta estructura presenta un patrón dentro de la masa central. Este patrón es de una matriz de 3x3 cavidades, una segunda matriz de 3x2 y una matriz de 2x1 (lo cual equivaldría a una columna de dos elementos).

Las dimensiones de cada una de las masas y brazos se encuentran en la tabla 2 - 28.

Estructura	Objeto/dimensión	w	l	r1	r2
Membrana 1	Brazo interno	50 μm	10 μm	-	-
	Brazo externo	70 μm	10 μm	-	-
	Masa	-	-	50.12 μm	-
	dona	-	-	94 μm	100 μm
Membrana 2	Brazo interno	21 μm	8 μm	-	-
	Brazo externo	15 μm	8 μm	-	-
	Masa	-	-	50.12 μm	-
	Cuadrado	150 μm	150 μm	-	-
	Cavidad cuadrada	140 μm	140 μm	-	-
Membrana 3	Brazo interno	7.5 μm	10 μm	-	-
	Brazo externo	7.5 μm	50 μm	-	-
	Masa	-	-	35 μm	50 μm
	Dona	-	-	55 μm	60 μm
	Puente	26.5 μm	10 μm	-	-
	Masa puente	20 μm	20 μm	-	-
Membrana 4	Brazo interno	7.5 μm	10 μm	-	-
	Brazo externo	7.5 μm	50 μm	-	-
	Masa	-	-	50 μm	-
	Dona	-	-	55 μm	60 μm
	Cavidad	10 μm	10 μm	-	-

TABLA 2 - 28 MEMBRANAS, C4.

➤ Resortes.

En esta última sección de la clasificación de estructuras del chip C4, se presentan resortes con una masa. Cada una de las estructuras que se encuentran en esta sección cuenta con una masa; dichas masas cuentan con las mismas dimensiones. La característica que las hace únicas dentro de este apartado es el resorte que las une al ancla; en la Fig. 2- 42 se pueden observar estas estructuras.

Las estructuras que se encuentran en esta sección fueron extraídas del trabajo de Perello [19]; estas estructuras forman parte de la investigación del comportamiento de un resonador MEMS orientado a la detección de gases.

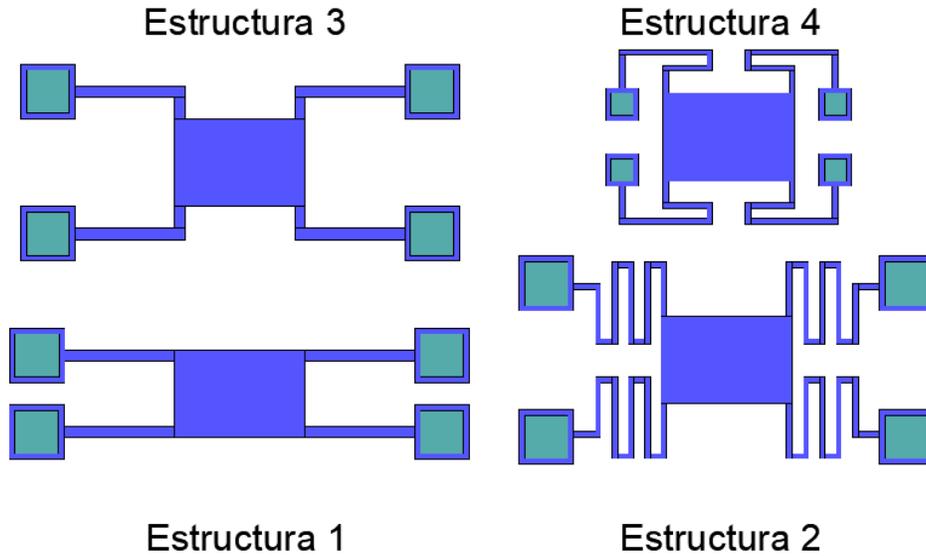


FIG. 2- 42 RESORTES, C4.

Como se mencionó anteriormente, cada una de estas estructuras cuenta con la misma masa, sin embargo, los brazos que sujetan a la masa son distintos; en la tabla 2 – 29 se encuentran las dimensiones de cada brazo de las distintas estructuras que se encuentran en la Fig. 2 – 42.

Objeto/medidas	w	l
Masa	120 μm	80 μm
Resorte estructura 1	100 μm	10 μm
Resorte estructura 2	105 μm	10 μm
Resorte estructura 3	5 μm	80 μm
Resorte estructura 4	5 μm	75 μm

TABLA 2 - 29 RESORTES, C4.

El motivo principal de utilizar la misma masa para cada una de las estructuras y solamente cambiar los brazos que sostienen a la misma, es para evaluar qué tipo de resorte le da más estabilidad a la estructura post- micromaquinado; es importante aclarar que cada resorte puede utilizarse para una aplicación particular, pero el motivo de este proyecto es el de evaluar estructuras de prueba, con el fin de obtener un proceso de micromaquinado óptimo.

2.7 Conclusión.

Las estructuras de prueba son estructuras básicas o primitivas que permiten hacer una evaluación al resultado del proceso de fabricación de estructuras MEMS. Para realizar éstas es necesario tomar en cuenta primeramente las limitaciones propias de toda la tecnología.

Las limitaciones de la tecnología están dadas desde el equipo y la resolución de los procesos litográficos, hasta el tipo y materiales empleados en las capas de sacrificio y en las capas estructurales.

Es necesario diseñar estructuras con distintas características, ya sea en forma o en dimensiones, para obtener una base de datos amplia, y así poder delimitar las dimensiones básicas para el diseño y fabricación de estructuras MEMS en las instalaciones del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías – IPN.

Capítulo III Simulaciones.

3.1 Introducción.

En la actualidad existe una gran variedad de software para el diseño y simulación de elementos o dispositivos. Estos programas son de gran ayuda para predecir el comportamiento que pueden llegar a tener los elementos simulados. Si bien, existen programas especializados, también existen programas con un gran abanico de opciones de simulación.

El análisis mediante simulación tiene un gran peso actualmente, ya que esta herramienta nos permite tener una perspectiva sobre el comportamiento de los procesos, lo cual nos permite optimizar recursos con el fin de tener modelos eficientes.

COMSOL multiphysics es un programa de simulación de propósito general basado en métodos numéricos avanzados; este programa nos permite simular fenómenos electromagnéticos, mecánicos estructurales, acústicos, químicos, entre otros fenómenos.

Para obtener parámetros básicos sobre el comportamiento de las estructuras diseñadas en el capítulo anterior, es necesario analizar la simulación mecánica de las estructuras, para así poder modificar las estructuras antes del proceso de fabricación.

3.2 Simulación de estructuras.

El objetivo principal de hacer una simulación de cada estructura es para tener un estimado aproximado de la acción que tendría la estructura al momento de estar liberadas después del micromaquinado; debido a que estas estructuras tienen diferentes dimensiones y se pueden colapsar por el peso de las mismas. Hay que recordar que la capa estructural elegida para estos diseños es el aluminio. Obviamente, dentro de las simulaciones no se considera la capa de sacrificio ya que ésta ya se considera eliminada en la estructura simulada.

Cada chip cuenta con distintas estructuras, las cuales están catalogadas en distintos rubros, sin embargo, algunos chips no cuentan con algunas de estas categorías, como termoactuadores, por ejemplo. Para esta sección, se tomaron en cuenta los bloques comunes entre los chips, los cuales son los siguientes:

- Cantiléver.
- Puentes.

En los grupos mencionados anteriormente, se encuentra la mayor concentración de estructuras, por ello solamente se analizarán estructuras de distintos chips con características similares; esto se hará con la finalidad de comparar el desplazamiento total que tienen las estructuras cuando cambian sus dimensiones, se le agregan elementos o en su defecto, cambia el punto de anclaje.

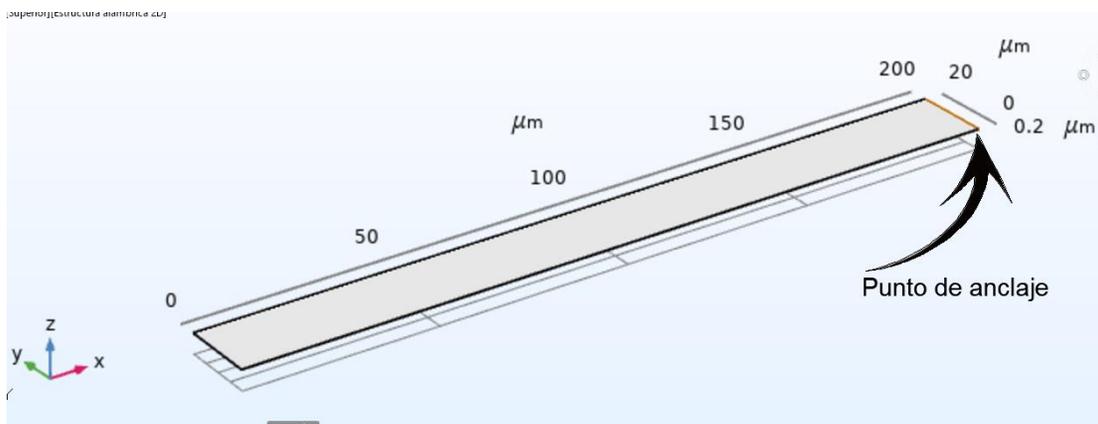
Las simulaciones hechas se realizaron con solo una fuerza de acción actuando en el eje z para evaluar el comportamiento de desplazamiento que tiene la estructura; la fuerza que se aplicó a cada estructura es de 9.8 m/s^2 (1 g a lo largo del eje Z), simulando la fuerza de gravedad. A continuación, se presentan las simulaciones y los resultados del desplazamiento de algunas estructuras.

3.2.1 Cantiléver.

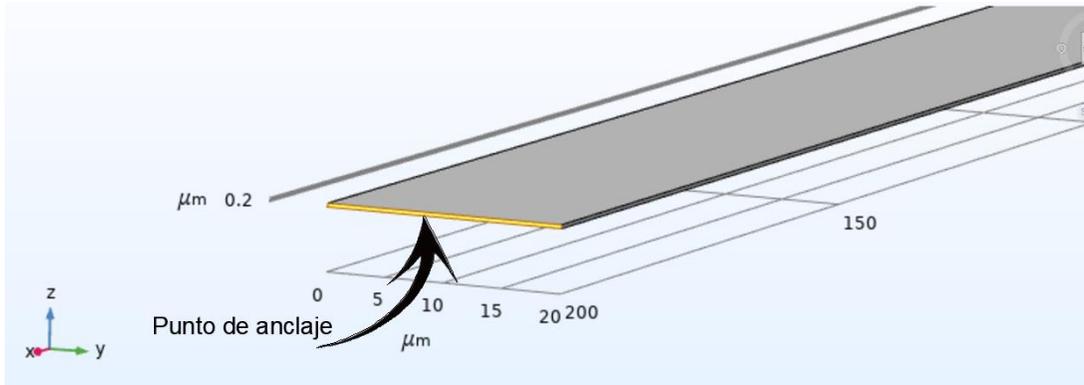
La primera estructura a analizar son los cantilévers. En este caso, solamente se analizará la estructura básica, la cual se encuentra en la Fig. 2 – 8, debido a que se requiere la comparación de estructuras similares, y como se vio en la sección anterior, hay una gran variedad de diseños en los cantilévers.

El primer cantiléver que se analizará se encuentra en el chip C2. Este cantiléver lleva por nombre “C1”, y se encuentra en la Fig. 2 – 23. Las dimensiones de esta estructura son de $w=200 \mu\text{m}$ y $l= 20 \mu\text{m}$; el cantiléver con el que se hará la comparación se encuentra en el chip C3 y lleva por nombre CH1 y se encuentra en la Fig. 2 - 30, este cantiléver está diseñado con $w=150 \mu\text{m}$ y $l= 15 \mu\text{m}$.

En la Fig. 3 – 1a se encuentra el cantiléver “C1” del chip C2; este cantiléver es una estructura convencional o “básica”, ya que es la forma primitiva de la estructura. Esta figura muestra el punto de anclaje de la estructura, mientras que en la Fig. 3 - 1b se muestra la vista lateral de la estructura, donde se encuentra el anclaje de la misma.



a)



b)

FIG. 3 - 1 CANTILÉVER C1, CHIP C2.
a) Vista Frontal, b) Vista lateral.

El punto de anclaje en las estructuras es el área donde está sujeta la estructura móvil a una estructura fija, comúnmente se le conoce como apoyo fijo o empotramiento del cantiléver. El punto de apoyo es el área que sufre más estrés en toda la estructura, por lo cual, es importante no agregar demasiada carga en la estructura, ya que, en el caso de los cantilévers, solo tienen un punto de apoyo, lo cual provoca que la carga sea limitada.

En este caso se analizará la deflexión del cantiléver, o también conocido como desviación. Como ya me mencionó, se aplicará una fuerza uniforme, en toda el área transversal, lo cual provocará el movimiento del cantiléver en el eje z. En la Fig. 3 – 2, se muestra el cantilever CH1 del chip C3, en esta imagen se ejemplifica la dirección en la que se aplica la fuerza.

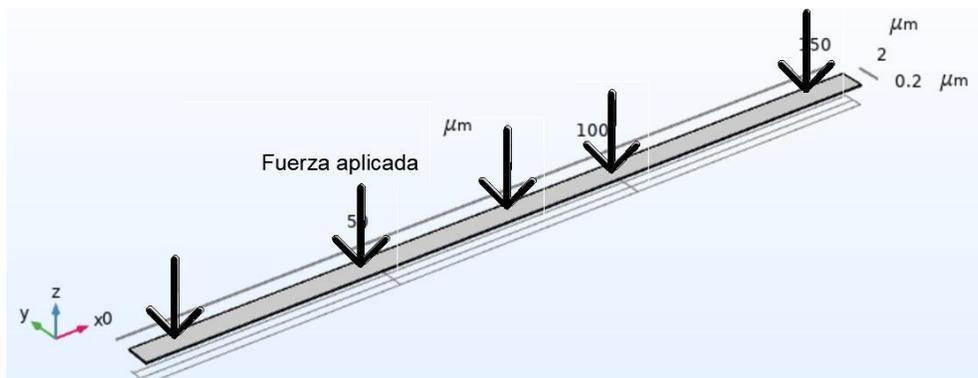
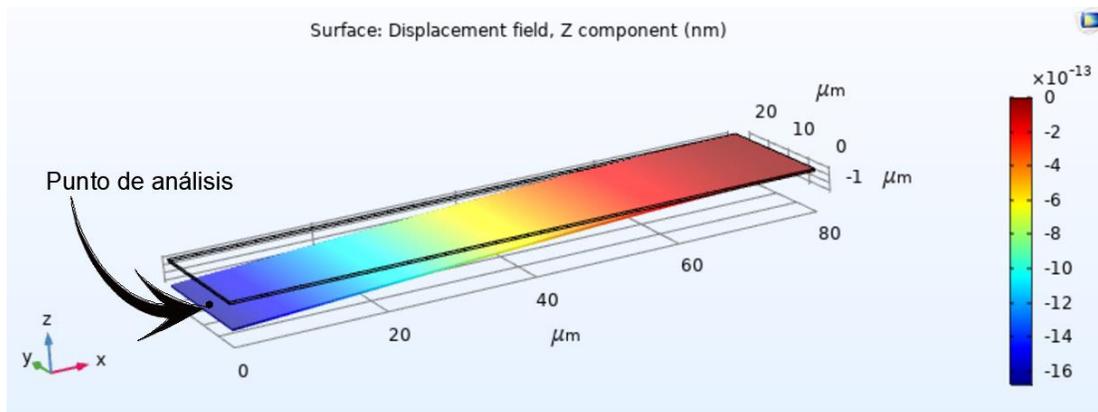


FIG. 3 - 2 CANTILÉVER CH1, CHIP C3.

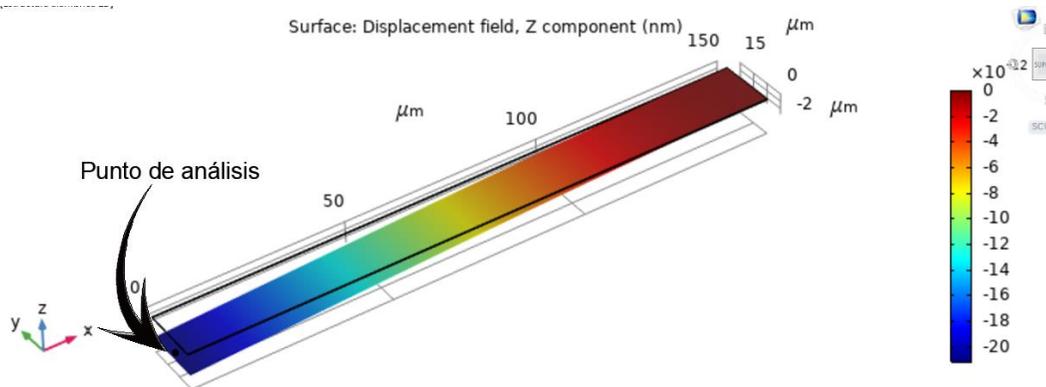
Debido a que es una fuerza uniforme, el estrés generado en cada una de las estructuras diferirá debido al área de la sección transversal; este estrés que sufren las estructuras está dado por la distribución uniforme de la fuerza, por lo cual, a mayor área se tendrá menor tensión; este estrés puede provocar una fractura en la estructura, sin embargo, el análisis realizado a estas estructuras es puramente de desplazamiento.

En la Fig. 3 – 3 se encuentran las simulaciones realizadas a los cantilévers mencionados; la evaluación del desplazamiento se realizó en el borde opuesto en el que se encuentra en ancla, ya que en esta región se encuentra el mayor desplazamiento en este tipo de estructuras.

En cada una de las figuras se encuentra una escala de colores, esta escala indica el menor y el mayor desplazamiento registrado en cada una de las simulaciones y permite identificar de manera práctica el área de mayor desplazamiento. En ambas figuras, se observa que el desplazamiento es nulo, esto se debe precisamente a que en esa sección se encuentra el ancla, y mientras más avanzamos en la sección transversal, se observa la deflexión del cantiléver. Esta deflexión se debe a que cada material tiene un coeficiente de elasticidad, lo que impide que el material se doble sin romperse, claro, cada material tiene sus límites.



a)



b)

FIG. 3 - 3 SIMULACIÓN DE CANTILÉVERS.
a) Cantilever C1, Chip C2; b) Cantilever CH1, Chip C3.

Cada una de las estructuras que se encuentran en la Fig. 3 -3, cuentan con un punto de análisis; este punto se encuentra en los límites del cantiléver, donde se encuentra el mayor desplazamiento en el eje Z. Las coordenadas de cada uno de estos puntos se encuentran en la tabla 3 -1 y en la tabla 3 -2.

Eje	x	y	Z
Coordenada de evaluación (nm)	0.1844	10.06	0
Coordenada de desplazamiento (nm)	0.1844	10.06	6.6937×10^{-11}

TABLA 3 - 1. CANTILÉVER C1, CHIP C2.

Eje	x	y	Z
Coordenada de evaluación (nm)	0.0419	7.5093	0
Coordenada de desplazamiento (nm)	0.0419	7.5093	2.1221×10^{-11}

TABLA 3 - 2. CANTILÉVER CH1, CHIP C3.

El cantiléver del chip C3 tiene un menor desplazamiento en el eje z, con respecto al cantiléver del chip C2, esto se debe a que la masa del cantiléver CH1 es menor. Sin embargo, ambos desplazamientos son pequeños, por lo cual pueden ser despreciables, ya que el desplazamiento de ambos cantilévares se encuentra en el rango de $\times 10^{-11}$ nm.

Como se mencionó anteriormente, el desplazamiento mostrado en estas simulaciones solamente es con el efecto de una fuerza de 9.8 m/s^2 , simulando solamente la gravedad.

3.2.2 Puentes.

Las estructuras tipo puente que se presentan en esta sección corresponden al chip C2; estas estructuras cuentan con una $l=150\mu\text{m}$ y $w=10\mu\text{m}$ en cada brazo, mientras que el centro de masa es una estructura tipo dona con un radio interno $r_{int}=20\mu\text{m}$, mientras que el radio externo es de $r_{ext}=30\mu\text{m}$. Se tomaron dos estructuras del mismo chip ya que ambas estructuras cuentan con características similares, sin embargo, una de las estructuras cuenta con una unión dentro de la dona.

Una hipótesis sobre el comportamiento de estas estructuras es que, al momento de liberarse, éstas pueden colapsar debido a la concentración de masa en el centro de la estructura, y al tener brazos considerablemente largos y delgados pueden provocar que la estructura se flexione.

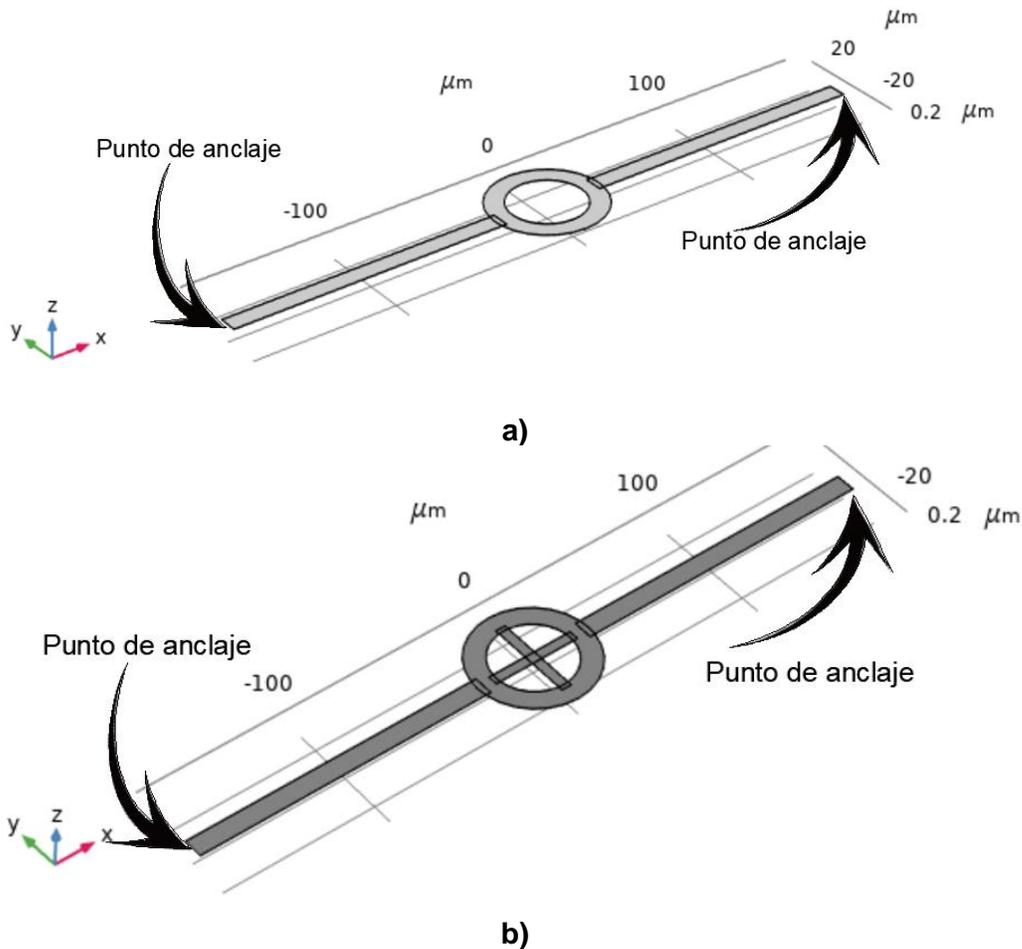


FIG. 3 - 4 PUENTES, CHIP C2.
a) Puente A; b) Puente B.

La Fig. 3 -4 muestra las estructuras tipo puente, en ella se señala el punto de anclaje de ambas estructuras; también se observa la única diferencia que hay entre ambas estructuras. Este tipo de estructuras, al tener dos puntos de anclaje, se espera que sea más estable, teniendo una deflexión menor al que se presenta en los cantiléver, ya que estos últimos solo tienen un punto de anclaje.

Al tener dos apoyos fijos, provocará que la estructura se encuentre más tensa, por lo que la estructura podría tomar una forma de parábola suave al momento de liberarse, teniendo el valle (punto máximo de decaimiento) de esta parábola en el centro de la estructura, donde se encuentra la masa.

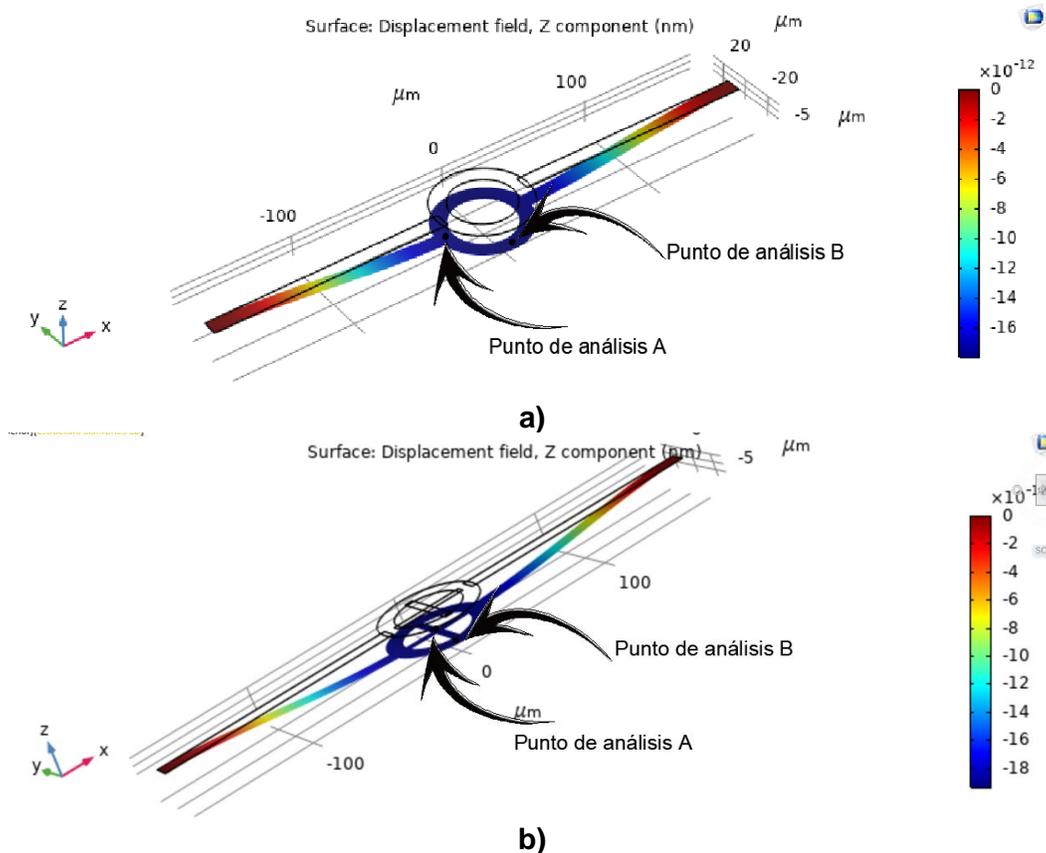


FIG. 3 - 5 SIMULACIÓN DE PUENTES, CHIP C2.
a) Puente A, b) Puente B.

La Fig. 3 – 5 muestra la simulación de las estructuras tipo puente. Al igual que las simulaciones de los cantilevers, estas simulaciones cuentan con un gráfico de color, lo que ayuda a la visualización de las áreas con mayor desplazamiento. En estas estructuras el mayor desplazamiento se encuentra en el centro de la estructura, donde se sitúa la masa.

En el caso de estas estructuras se evaluaron dos puntos; para el puente A, se tomó como primer punto la unión entre los brazos y la masa, mientras que el segundo punto se tomó en un punto aleatorio de la masa, como se muestra en la Fig. 3 – 5a. Para el puente B se tomó como primer punto el centro de la masa, que se encuentra en la intersección de los puentes, mientras que el segundo punto se tomó en una sección de la dona.

Eje	x	y	Z
Coordenada de evaluación (nm) Punto A.	-27.7151	0.03	0
Coordenada de desplazamiento (nm) Punto A.	-27.7151	-0.03	1.726×10^{-11}
Coordenada de evaluación (nm) Punto B.	2.8779	-27.872	0
Coordenada de desplazamiento (nm) Punto B.	2.8779	-27.872	1.795×10^{-11}

TABLA 3 - 3 PUENTE A, CHIP C2.

Eje	x	y	Z
Coordenada de evaluación (nm) Punto A.	-0.1281	-0.2142	0
Coordenada de desplazamiento (nm) Punto A.	-0.1281	-0.2142	1.939×10^{-11}
Coordenada de evaluación (nm) Punto B.	0.0641	-29.784	0
Coordenada de desplazamiento (nm) Punto B.	0.0641	-29.784	1.941×10^{-11}

TABLA 3 - 4 PUENTE B, CHIP C2.

En la tabla 3 – 3 se encuentran los puntos donde se evaluó el desplazamiento del puente A, ambos puntos se consideraron dentro de la masa, ya que ésta es la que tuvo mayor desplazamiento; debe observarse que el punto B se encuentra por debajo del punto A, lo que indica que el área del punto B sufre un pandeo. En el puente B también se encuentra el mismo fenómeno de pandeo, sin embargo, en esta estructura, los brazos que unen la masa por dentro da mayor estabilidad, sin embargo, provoca que la estructura tenga mayor desplazamiento en el eje z.

3.3 Conclusiones.

A grandes rasgos, las simulaciones arrojaron resultados favorables, ya que el desplazamiento total que tienen las estructuras queda en el rango de $\times 10^{-11}$ nm; por lo que, teniendo un espesor de aproximadamente 350 nm, el desplazamiento que tienen las estructuras es despreciable.

Sin embargo, el análisis realizado solamente fue hecho con una fuerza que actúa sobre la estructura en el eje Z, lo cual implica solamente un resultado aproximado, ya que si se desea realizar un análisis más acorde a la realidad es necesario una simulación dinámica, en la cual se agreguen fuerzas de tensión superficial de distintas sustancias, estrés por calentamiento, estrés residual, etc.

Por el momento, la simulación realizada es suficiente para un análisis superficial del comportamiento de la estructura, ya que, el objetivo principal de la simulación realizada es el de evaluar el desplazamiento que tiene la estructura en el eje Z, el cual se vería afectado al momento de la liberación de la estructura.

A pesar de que algunas estructuras se podrían considerar “grandes” en comparación con otras estructuras más pequeñas, no varía tanto el desplazamiento. Sin embargo, para las estructuras más grandes se les colocaron 4 anclas, lo cual genera mayor tensión en la estructura

Capítulo IV Fabricación de estructuras de prueba en el CNMN-IPN.

4.1 Introducción.

Estrictamente hablando, la fabricación de estructuras MEMS es el proceso de micromaquinado que se utiliza para la liberación de estructuras; la liberación de estructuras consiste en eliminar el óxido de silicio (capa de sacrificio) de la oblea, dejando así el material que conforma la capa estructura (Al). Sin embargo, existe una serie de pasos previos al proceso de micromaquinado, estos procesos se desarrollan en base a la tecnología con la que cuentan el laboratorio, en este caso el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías – IPN.

Sin tomar en cuenta el diseño de estructuras y la simulación de las mismas, el primer paso para la fabricación de estructuras MEMS es el crecimiento de una capa de óxido sobre la oblea de silicio. El crecimiento de óxido de silicio puede ser mediante un tratamiento húmedo o seco.

Sin embargo, este paso dentro del proceso de fabricación no se detalla, debido a que las obleas utilizadas en esta tesis, ya contaban con el óxido de silicio, por lo que se desconoce el método utilizado para hacer crecer el óxido en la oblea.

A lo largo del capítulo se detalla el proceso posterior al crecimiento de óxido, el cual es el depósito de aluminio, fotolitografía y grabado de aluminio, ya que estos son los pasos realizados previos al proceso de micromaquinado.

4.2 Depósito de aluminio.

Existen muchos métodos para el depósito de películas delgadas; en el caso de los chips fabricados en el Centro de Nanociencias se utilizó el proceso de metalización por pulverización catódica o *Sputtering*.

El proceso por pulverización catódica se inicia introduciendo un gas noble dentro de una cámara de vacío, posteriormente se aplica una diferencia de potencial entre el ánodo y cátodo (blanco), provocando que el gas inerte que se encuentra dentro de la cámara forme un plasma. Con la formación de plasma, también se forman iones con carga positiva, los cuales son acelerados hacia la superficie del blanco, bombardeando así dicha superficie, provocando la expulsión de partículas del blanco. Estas partículas viajan a través de la cámara, depositándose en el sustrato [25,26,27].

El Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, CNMN, cuenta con un equipo para depósito de películas delgadas “Sputtering V3”; este equipo tiene la capacidad de 4 blancos simultáneos y cuenta con 2 fuentes de DC y 2 fuentes de RF, mientras que el plasma se realiza con argón. Algunos materiales que se trabajan en el equipo son: ZnO (óxido de zinc), Al (aluminio), Cu (cobre), Cr (cromo), entre otros.

Para la fabricación de los chips se utilizaron 2 obleas de Silicio, estas obleas cuentan con un espesor de óxido de 500 nm, mientras que el diámetro de cada una de las obleas es de 4” con orientación <100>.

El espesor de la capa metálica depositada fue de 350 nm, esta capa depositada fue hecha de aluminio. En la Fig. 4 -1 se muestra una oblea de silicio con la capa de aluminio depositada.

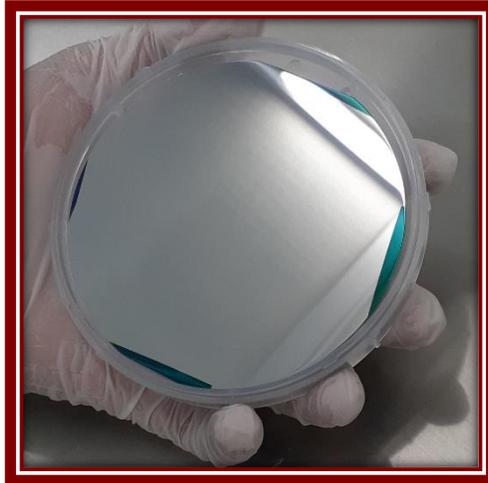


FIG. 4 - 1 OBLEA DE SILICIO POST DEPÓSITO DE PELÍCULA DELGADA DE ALUMINIO.

4.3 Fotolitografía.

Posterior al depósito de la película delgada en la oblea de silicio, se hace un proceso llamado fotolitografía; la fotolitografía es usada para la transferencia de patrones, estos patrones son transferidos desde una mascarilla a un polímero fotosensible. Estos patrones son necesarios para fabricar estructuras en la película depositada sobre el sustrato [28, 29]

Este proceso también es llamado litografía óptica, ya que es una técnica que utiliza polímeros fotosensibles a una fuente de luz y, dependiendo del material utilizado, se puede utilizar una mascarilla positiva o negativa.

Para el proceso fotolitográfico del chip DRS se utilizó un método convencional para la transferencia de patrones, el cual consiste en el depósito de una fotoresina (positiva) al sustrato mediante la técnica llamada “spin coating”, el cual consiste en colocar la oblea de silicio en el “spinner” (ver Fig. 4 -2), y agregar un poco de resina; lo que hace el “spinner” es distribuir la resina y alcanzar un espesor específico, haciendo girar la muestra a 3,915 RPM.



FIG. 4 - 2 SPINNER.

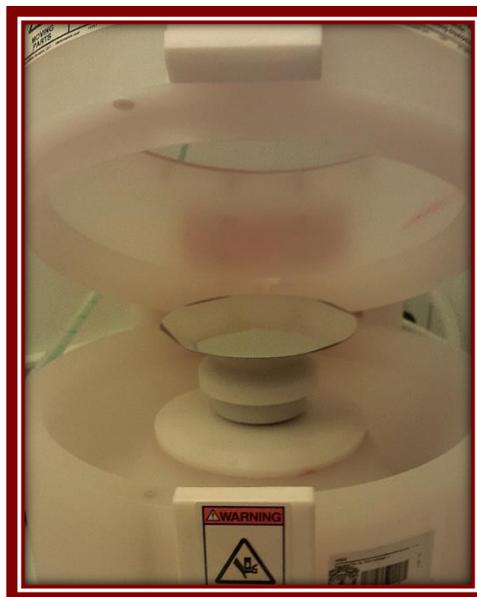


FIG. 4 - 3 SPINNER CON OBLEA.

Posteriormente se lleva la muestra a un tratamiento térmico durante 1 minuto a 115°C para adherir la resina a la oblea. Una vez terminado este proceso, se lleva la oblea al sistema de alineación de mascarillas EVG62; en este equipo, se hace la transferencia de patrones de una mascarilla a la resina fotorresistente, el equipo utiliza luz UV para la transferencia de patrones.

Una vez terminada la transferencia de patrones, se lleva la muestra a una campana de revelado. En esta campana se sumerge la muestra en una sustancia llamada revelador; debido a la exposición de la resina a la luz UV provoca que el área expuesta se “endurezca”, haciéndola más resistente al revelador, provocando así que las zonas no expuestas se diluyan en esta sustancia, dejando expuesto el patrón de la mascarilla en la resina. El ataque con revelador dura aproximadamente 45s, y posteriormente se lava rápidamente la muestra para detener el ataque y se seca con nitrógeno, para evitar contaminantes en la muestra. Al finalizar este proceso se hace un grabado, el cual se verá en la sección siguiente. En la Fig. 4 -4 se observa la oblea en una caja de Petri, haciéndose el proceso de revelado.

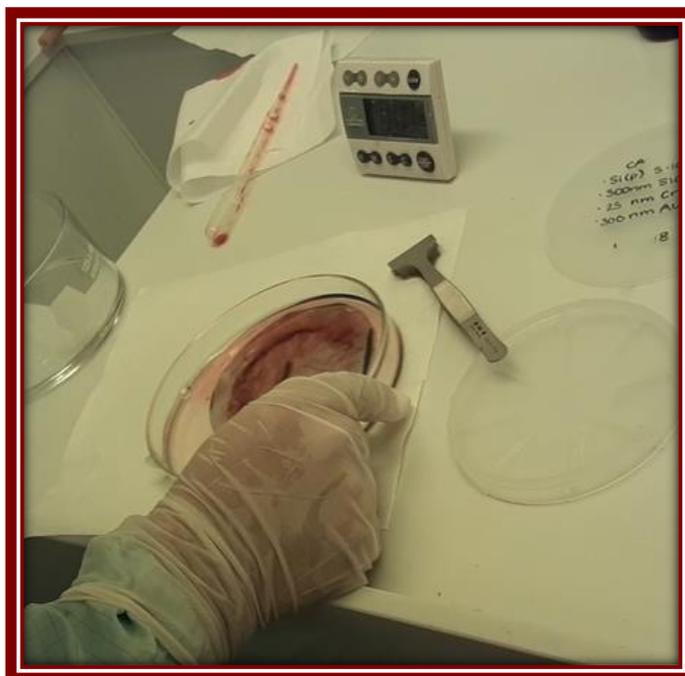


FIG. 4 - 4 REVELADO.

Para los chips C1 al C4, éstos se hicieron con fotolitografía por escritura directa, por lo que, a diferencia del chip DRS, estos últimos no usaron una mascarilla para la transferencia de patrones. En el caso de estos últimos chips se utilizó el equipo de fotolitografía HEIDELBERG DWL 66FS. Este equipo utiliza un modulador de luz especial; este modulador realiza una proyección del diseño directamente en la muestra.

4.4 Grabado de aluminio.

El grabado de aluminio es el penúltimo paso antes de llegar al micromaquinado de estructuras; el procedimiento del grabado de aluminio es el ataque del aluminio expuesto en la muestra, este ataque puede ser seco (plasma) o húmedo (ácidos).

El grabado de aluminio hecho a los chips fabricados en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnología del IPN se realizó por vía húmeda. El procedimiento fue el siguiente:

Como reactivo se utilizó una solución hecha con 80wt% de ácido fosfórico, 5wt% de ácido nítrico, 5wt% de ácido acético y 10wt% de agua. Este reactivo se calentó hasta los 50°C para aumentar su tasa de ataque; la tasa de ataque del reactivo a 25°C es de aproximadamente 180 nm/min, mientras que la tasa de ataque a 50°C es de aproximadamente 660 nm/min.

Para el grabado de aluminio se utilizaron dos vasos de precipitados; En uno de los vasos se agrega el reactivo a utilizar y posteriormente se calienta a 50°C, al segundo vaso se le agrega agua desionizada, este vaso se utilizará para detener el ataque del reactivo en la muestra.

Con la ayuda de un soporte o pinzas, se sumerge la muestra dentro del primer vaso por unos minutos, hasta que la muestra haya cambiado de color. Una vez que la muestra muestre un cambio de tonalidad, ésta se lleva rápidamente al vaso con agua desionizada, para detener el ataque, en la Fig. 4 -5 se ilustra este procedimiento.

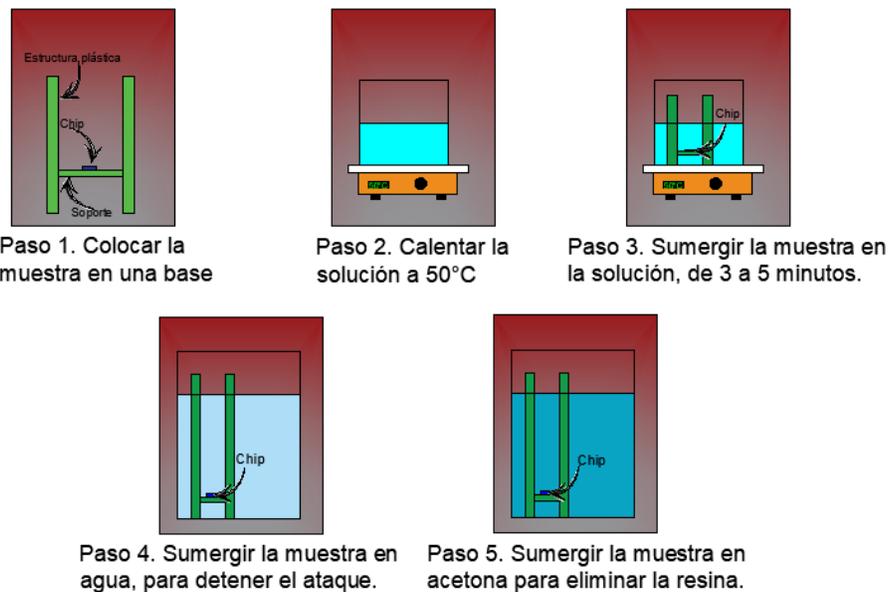


FIG. 4 - 5 PROCESO DE GRABADO DE ALUMINIO.

Terminado este procedimiento, se remueve la resina que hay depositada en el chip con acetona. El reactivo utilizado para el grabado de aluminio no tiene reacción con

la resina utilizada, por lo cual es necesario removerla terminado el grabado de aluminio.

En la Fig. 4 – 6 se muestra el chip DRS sin hacer el grabado de aluminio. Mientras que en la Fig. 4 – 7 se muestra el chip DRS posteriormente de hacer el proceso ya mencionado.

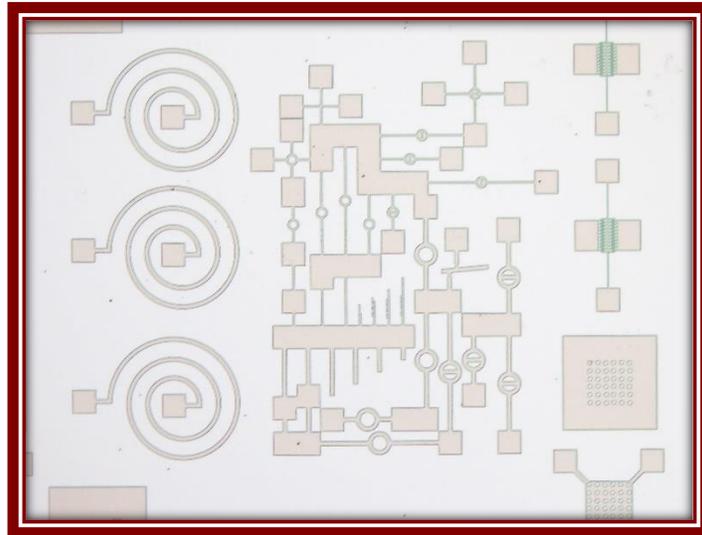


FIG. 4 - 6 CHIP DRS, PREVIO A GRABADO DE ALUMINIO.

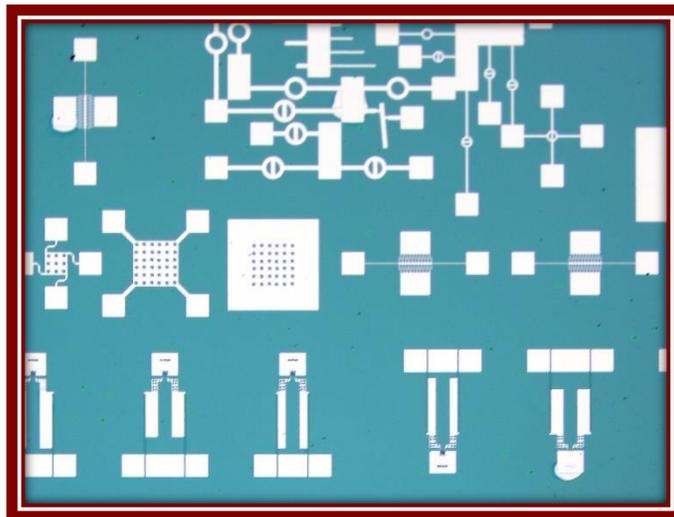


FIG. 4 - 7 CHIP DRS POSTERIORMENTE DEL GRABADO DE ALUMINIO.

4.5 Conclusiones.

En la actualidad existen una gran variedad de procesos y métodos necesarios para la fabricación de estructuras MEMS, por ello, es necesario conocer el método propio del laboratorio en el cual se hará todo este procedimiento.

El Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnología - IPN, cuenta con una variedad de equipos de última generación para el depósito de películas delgadas, como también cuenta con equipo para la transferencia de patrones por distintos métodos.

La transferencia de patrones es el proceso más delicado dentro de este conjunto de elementos, debido a que es necesario distribuir la resina de manera homogénea en toda la oblea, posteriormente, alinear la oblea con la mascarilla o en su defecto realizar una proyección con escritura directa.

La ventaja de utilizar polímeros fotosensibles para transferir los patrones, es que si hubo un error durante el proceso de transferencia (ataque con luz UV) y en el proceso de revelado los patrones no se transfirieron de manera correcta o tienen defectos, existe la opción de remover toda la resina con acetona y volver a realizar dicho procedimiento desde el depósito de la resina en la oblea.

Para acelerar el proceso de grabado es necesario aumentar la temperatura del reactivo, manteniendo los límites establecidos por el fabricante, o en su defecto, mantener la solución a una temperatura por debajo de su punto de cambio de fase.

Capítulo V. Pruebas experimentales y discusión de resultados.

5.1 Introducción.

El proceso de micromaquinado es el punto clave en la fabricación de estructuras MEMS, también se puede considerar como el punto decisivo o culminante en el proceso de fabricación; en la sección anterior se presentaron los primeros pasos para la fabricación de estructuras MEMS y cada uno de estos pasos tiene su mérito y su importancia, sin embargo, el proceso de micromaquinado es el paso decisivo para obtener estructuras MEMS.

El micromaquinado es un conjunto de procedimientos para el diseño y fabricación de estructuras; estos elementos pueden ser fabricados utilizando parte del sustrato o bien utilizando capas depositadas sobre el sustrato.

El micromaquinado se divide en dos ramas: el micromaquinado volumétrico y el micromaquinado superficial. Ambos tipos de micromaquinado se explican a detalle en el Capítulo I, por lo cual en esta sección se abordará solamente el micromaquinado de superficies.

Cuando se habla de micromaquinado superficial, tiene que ver con estructuras que se forman sobre la superficie del sustrato; este tipo de micromaquinado se caracteriza por el depósito de películas delgadas sobre el sustrato. Dichas películas delgadas deben de ser de distinto material al del sustrato, por lo que este tipo de micromaquinado debe de tener al menos 2 capas de material distinto al sustrato.

Las capas depositadas sobre la oblea llevan por nombre "*capa de sacrificio*" y "*capa estructural*", según su objetivo para formar la estructura MEMS; al momento de hacer el ataque en la oblea donde se encuentran las estructuras, se debe de tener

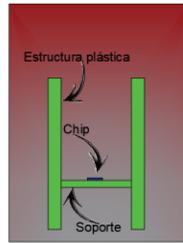
una tasa de ataque distinto para cada capa, siendo esto un ataque selectivo, por lo cual es importante que las capas depositadas sean de distinto material.

Existen distintas técnicas para hacer micromaquinado de superficies; está el grabado húmedo y por otro lado se encuentra el grabado seco, y cada una de ellas tiene ventajas y desventajas, por lo cual es importante saber seleccionar el tipo de grabado a utilizar y conocer el equipo con el que cuenta el laboratorio, así como sus limitantes.

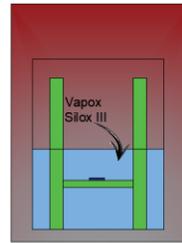
El desarrollo experimental utilizado en esta sección fue en base al desarrollo descrito por Abarca-Jiménez [30]; en este artículo se describe un grabado húmedo utilizando Vapox Silox III de Transene Company. Este proceso se inicia colocando la muestra en una base para posteriormente sumergirla en un recipiente con Vapox Silox III, posteriormente se hace una variedad de lavados con distintas concentraciones de agua desionizada + alcohol isopropílico, para finalmente llevar la muestra a un secado en horno a 120°C durante 45 min.

La Fig. 5 -1 muestra el procedimiento descrito anteriormente, así como también la concentración de la solución de agua desionizada + alcohol isopropílico; el tiempo de cada lavado que se propone es de 1 min, mientras que el tiempo de ataque del Vapox Silox III en el chip varía dependiendo del espesor de la capa de sacrificio que se desea remover, la temperatura del grabador, y la tasa de grabado de la solución.

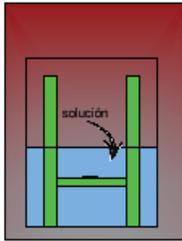
La tasa de grabado del Vapox Silox es de 4,000 Å/minuto a 22 ° C y en un ambiente seco. Sin embargo, si se desea aumentar la tasa de grabado es necesario incrementar la temperatura, ya que la tasa de grabado se duplica con un aumento de temperatura de 10 °C. Pero si se quiere reducir la tasa de grabado es necesario agregar 1 parte de agua desionizada a 2 partes de Vapox Silox III [31].



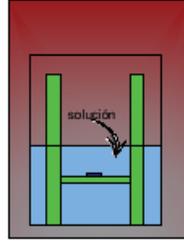
Paso 1. Colocar la muestra en una base



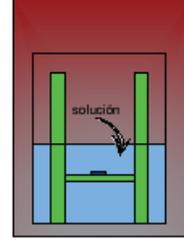
Paso 2. Sumergir la muestra en el grabador.



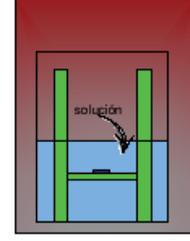
Paso 3. Sumergir la muestra en solución de 80wt% agua desionizada + 20wt% alcohol isopropílico



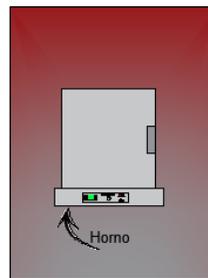
Paso 4. Sumergir la muestra en solución de 50wt% agua desionizada + 50wt% alcohol isopropílico



Paso 5. Sumergir la muestra en solución de 20wt% agua desionizada + 80wt% alcohol isopropílico



Paso 6. Sumergir la muestra en 100wt% alcohol isopropílico



Paso 7. Llevar la muestra al horno para secado, a 120°C

FIG. 5 - 1 PROCESO DE MICROMAQUINADO.

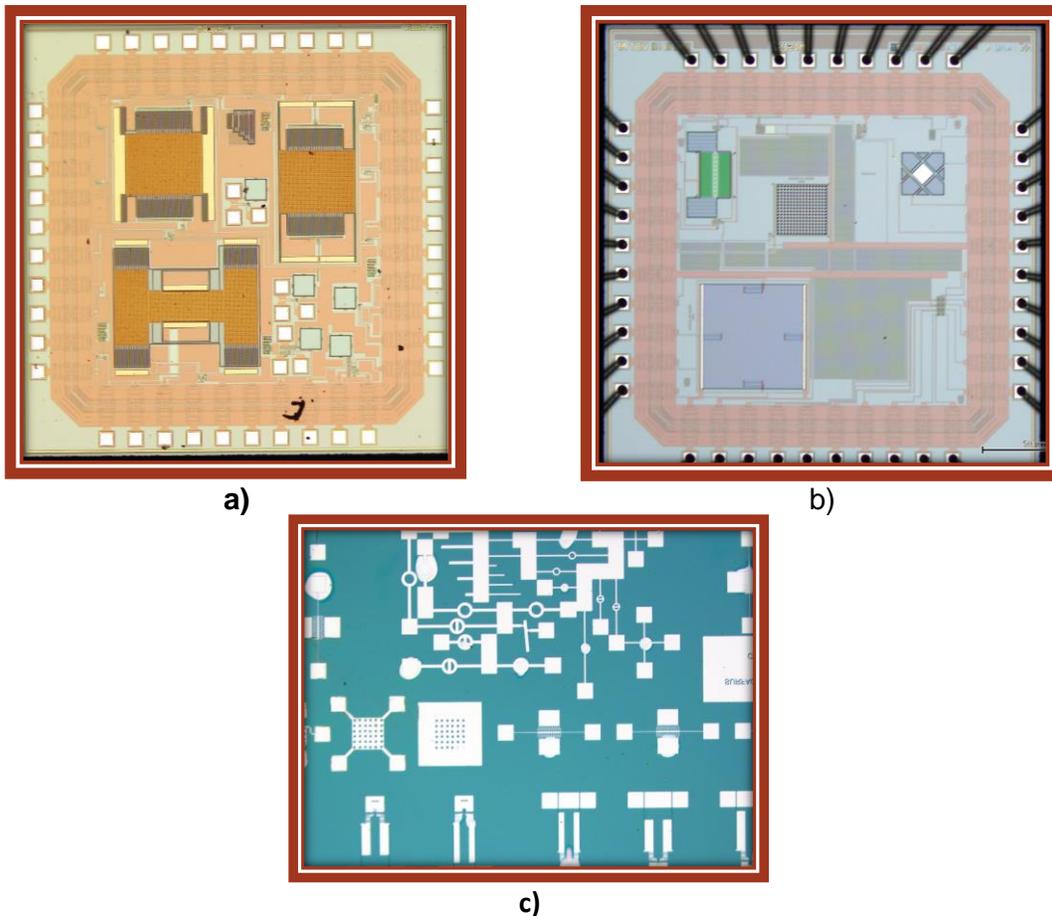
5.2 Proceso A – Micromaquinado por fragmentación de tiempo.

La primera modificación al proceso de micromaquinado mencionado anteriormente es la división del tiempo de grabado; esto quiere decir que, en lugar de hacer un grabado con un tiempo único, el grabado será en pasos cortos, este lapso de tiempo es diferente para cada chip utilizado como muestra.

Las muestras utilizadas en esta prueba fueron 3 chips, los cuales tienen distintos espesores y están fabricados con distintos materiales; en la Fig. 5 – 2 se muestra

una fotografía de cada uno de estos chips, esta fotografía fue obtenida con un microscopio óptico. Cada una de las muestras utilizadas se enlista a continuación:

- Chip CM1
- Chip CM2
- Chip DRS – CM3



**FIG. 5 - 2 MUESTRAS PARA MICROMAQUINADO, MICROSCOPIO ÓPTICO.
a) Chip CM1; b) Chip CM2; c) Chip DRS.**

El chip CM1 y el chip CM2 se fabricaron con tecnología CMOS a través de MOSIS. El primero de éstos cuenta con tres capas estructurales, las cuales son TiN/AlCu/TiN, mientras que la capa de sacrificio de este chip es de óxido de silicio (SiO_2), el chip CM2 tiene como capa estructural polisilicio, mientras que la capa de sacrificio es de SiO_2 .

Para el proceso de micromaquinado descrito por Abarca-Jiménez [30], se calcula el tiempo estimado de ataque con el Vapox Silox III; el tiempo de ataque estimado se calcula con la tasa de ataque del reactivo y el espesor de óxido que se desea eliminar. Por ejemplo, tomando en cuenta que la tasa de ataque del reactivo es de 400 nm/min, y el espesor del SiO₂ es de 5µm, tenemos un tiempo estimado de ataque de 12.5 min aproximadamente.

La variación entre el proceso descrito anteriormente y el proceso utilizado en la “Prueba A”, es que en lugar de hacer un ataque con Vapox Silox III de 12.5 min, se realizaron 12 ataques de 1 min, tomando el ejemplo anterior.

El chip CM1 tuvo un tiempo total de micromaquinado de 15. 5 minutos. Este chip sufrió muchos daños en las estructuras, así como también sufrió daños en los pads de aluminio y se formaron cristales en las estructuras, producto de una reacción entre el decapante y los materiales del chip. El chip CM2 sufrió daños en los resortes que sostienen al acelerómetro, sin embargo, no se pudo hacer un micromaquinado completo ya que se formó una capa en la masa de dicha estructura, impidiendo así que el Vapox Silox liberase la estructura completamente. Este chip tuvo un tiempo total de micromaquinado de 28 minutos. El chip CM3 sufrió daños en la mayor parte de las estructuras, este chip tuvo un tiempo total de micromaquinado de 75 segundos. En la Fig. 5 -3 se muestran los chips anteriores después del micromaquinado, éstas imágenes fueron tomadas desde el microscopio óptico.

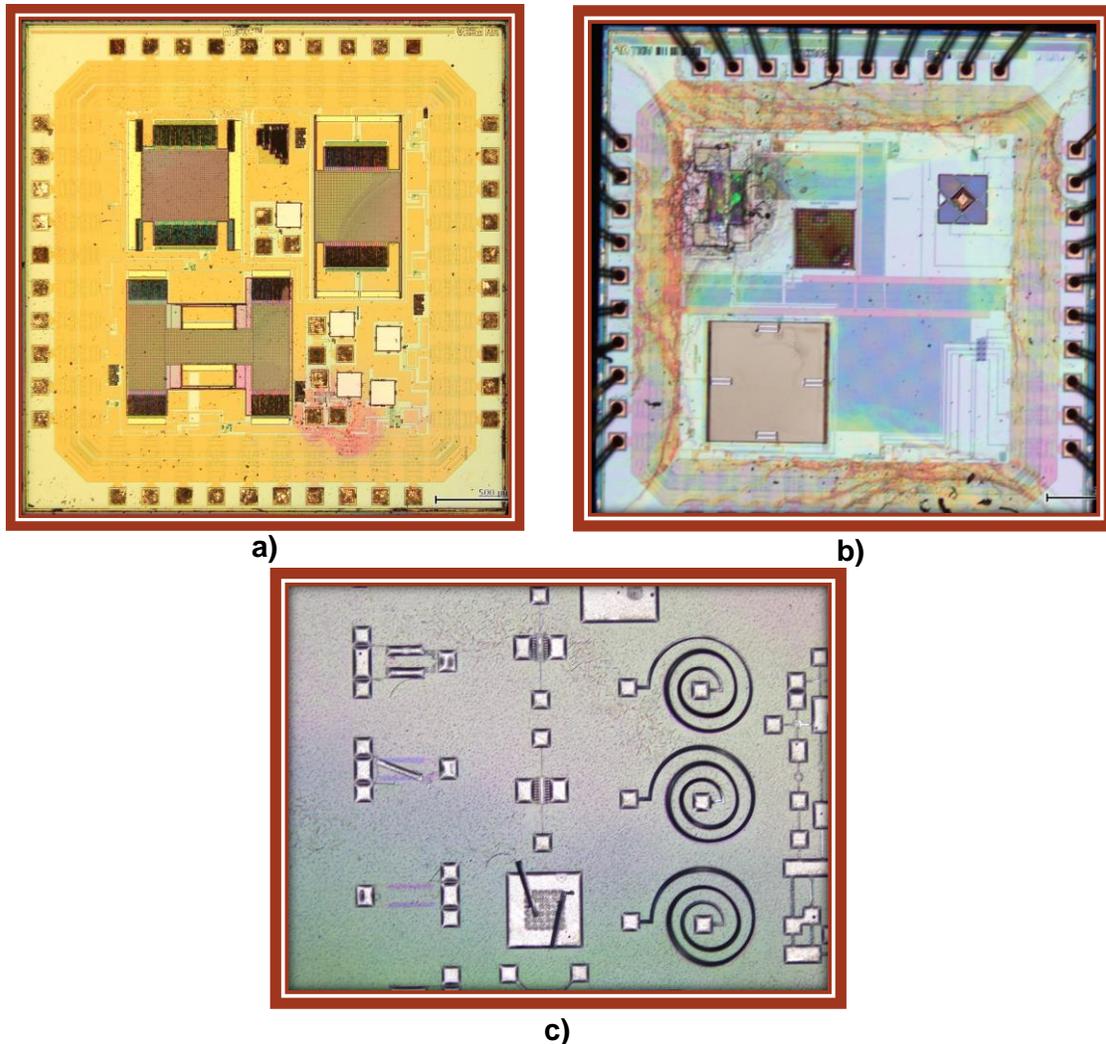


FIG. 5 - 3 CHIPS POST MICROMAQUINADO.
a) Chip CM1; b) Chip CM2; c) Chip DRS.

La Fig. 5 – 4 muestra el crecimiento de cristales de silicio entre los dedos de un acelerómetro, mientras que la Fig. 5 – 5 muestra el deterioro del pad, ambas figuras corresponden al chip CM1. El resultado del micromaquinado del chip CM2 se encuentra en la Fig. 5 – 6; en esta figura se observa una película delgada, la cual provocó que el Vapox Silox III se filtrara a través de ésta, sin embargo, esta película impidió que la estructura se liberara completamente.

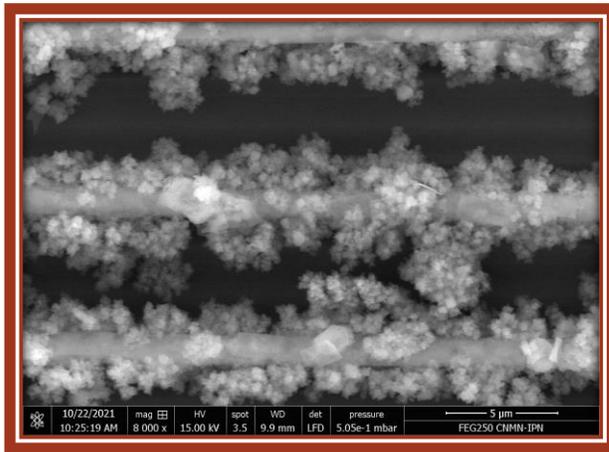


FIG. 5 - 4 CRISTALIZACIÓN DE SILICIO, MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

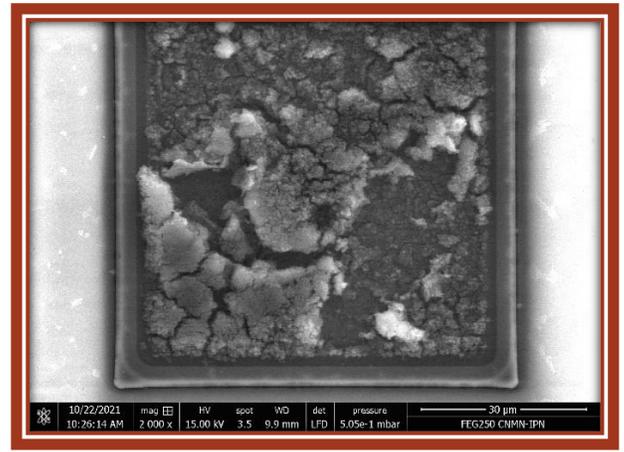


FIG. 5 - 5 PAD DETERIORADO, MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

El chip CM2 fue expuesto a distintos tratamientos para quitar la película formada en el acelerómetro; estos tratamientos fueron un ataque con HF de 20 s, limpieza con Piraña por 20s, que es una mezcla de ácido sulfúrico (H_2SO_4), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y agua, y por último se sumergió en un baño con acetona por 22 hrs; sin embargo, no hubo éxito al eliminar la película.

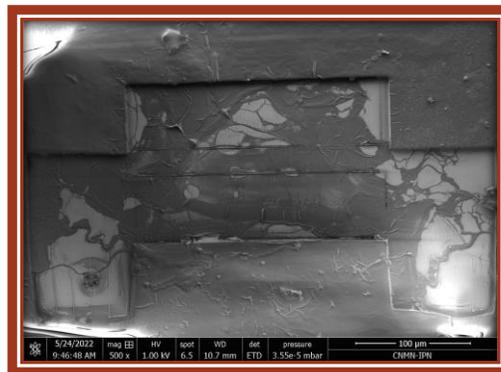


FIG. 5 - 6 ACCELERÓMETRO, CHIP CM2.

La Fig. 5 – 7 muestra algunas estructuras de la muestra CM3. En estas fotografías se observa que las estructuras se encuentran liberadas; sin embargo, algunas de estas estructuras presentan un doblamiento en algunos segmentos, por ejemplo, la estructura tipo espiral.

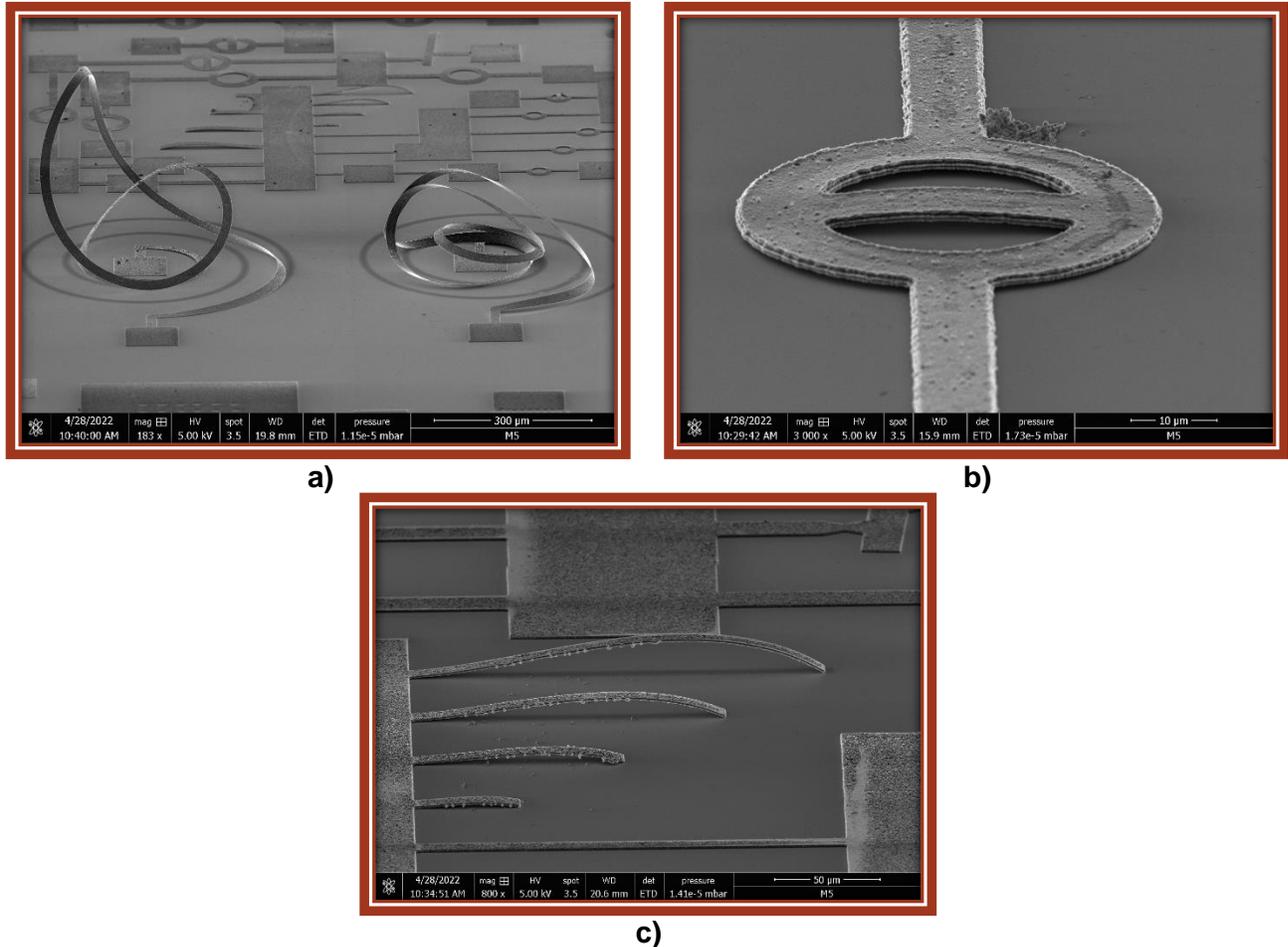


FIG. 5 - 7 ESTRUCTURAS CHIP CM3.

a) Estructura tipo espiral; b) Estructura tipo puente; c) Cantilévers.

La muestra CM1 cuenta con los siguientes problemas:

- Formación de cristales de silicio.
- Desprendimiento de estructuras.
- Daño excesivo a los pads de aluminio.

La muestra CM2 cuenta con los siguientes problemas:

- Contiene una película delgada que impide el micromaquinado.

La muestra CM3 cuenta con los siguientes problemas:

- Los cantilever se pandean después de ser liberados.
- Las estructuras son muy frágiles, por lo cual se llegan a romper.
- Algunas estructuras presentan crecimiento de cristales.

5.3 Proceso B - Micromaquinado con Resina.

La muestra CM4 es un chip fabricado en el CNMN, con las mismas características de la muestra CM3 que se encuentra en el proceso A, sin embargo, este chip se micromaquinó con resina presente sobre las estructuras; el objetivo de hacer este proceso sin hacer la limpieza final de acetona para quitar la resina es para proteger las estructuras.

El paso anterior del proceso del micromaquinado es el grabado de aluminio y posteriormente se hace una limpieza con acetona para remover la resina que se encuentra en el chip; sin embargo, para este proceso se dejó esta resina, tratando de proteger el aluminio de las estructuras y evitar la formación de cristales, el doblamiento de estructuras y que estas mismas se rompan.

El proceso de micromaquinado se realizó de la misma manera que el proceso A; este chip fue micromaquinado por 75s, en dos pasos de 30s y un paso de 15s. En la Fig. 5 – 8 se muestra la muestra CM4 después de micromaquinarla. Se observa que la resina ayudó a que algunas estructuras no se rompieran, sin embargo, parte de la resina se desprendió de las estructuras, quedando esta misma sobre el sustrato.

En la Fig. 5 – 9 se muestra el resultado de la muestra CM4 visto desde el microscopio electrónico de barrido. En esta figura se observa a detalle que las estructuras conservan parte de la resina, sin embargo, se muestra el crecimiento de cristales en el área donde se cayó parte de la resina.

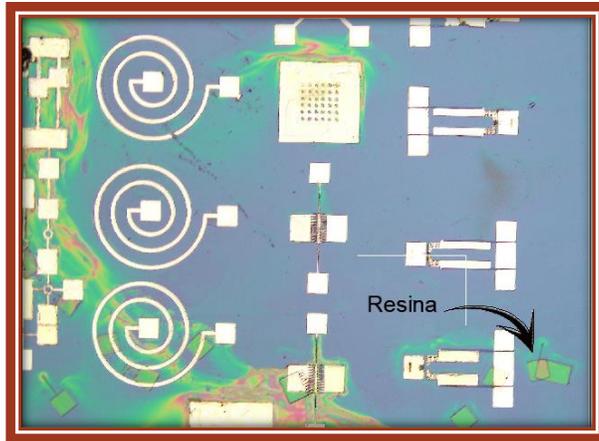
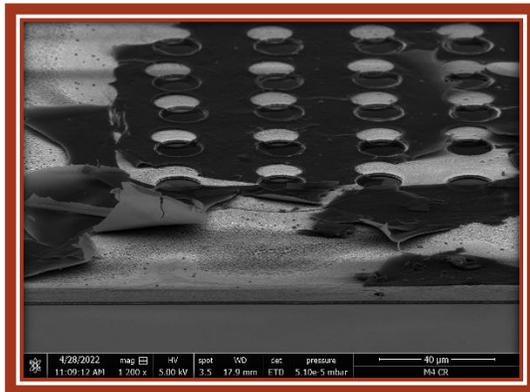
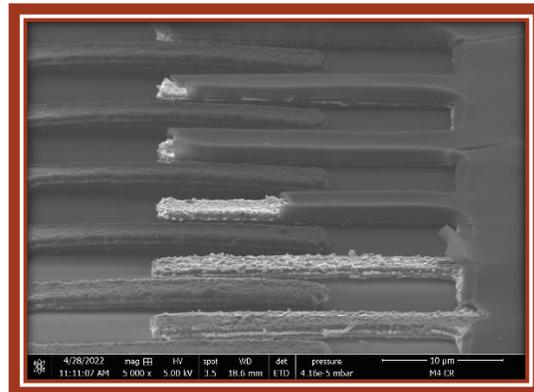


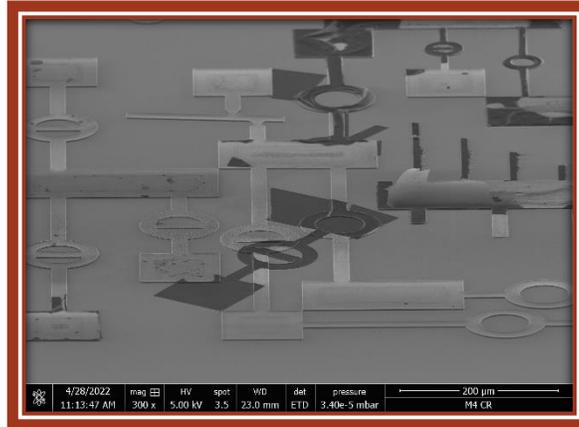
FIG. 5 - 8 MUESTRA CM4 POST MICROMAQUINADO.



a)



b)



c)

FIG. 5 - 9 MUESTRA CM4 POST MICROMAQUINADO.
a) Estructura tipo membrana; b) Dedos; c) Puentes.

El proceso B no cuenta con buenos resultados, ya que las estructuras se siguen rompiendo, pandeando y aún hay crecimiento de cristales en el área donde no se

encuentra la resina, por lo que la muestra CM4 cuenta con los mismos problemas de la muestra CM3.

5.4 Proceso C – Limpieza previa y lavado extra.

Este proceso se realizó con el chip CM2, y la muestra lleva por nombre CM5; el proceso de micromaquinado realizado a esta muestra fue el siguiente:

- Limpieza con acetona, alcohol isopropílico y agua.
- Micromaquinado utilizando Vapox Silox III por 47 min.
- 5 enjuagues.
 - Primer enjuague: 80wt% agua desionizada + 20wt% alcohol isopropílico.
 - Segundo enjuague: 50wt% agua desionizada + 20wt% alcohol isopropílico.
 - Tercer enjuague: 20wt% agua desionizada + 20wt% alcohol isopropílico.
 - Cuarto enjuague: 100wt% alcohol isopropílico.
 - Quinto enjuague: 100wt% alcohol isopropílico.
- Secado en horno a 50°C, durante 5 minutos.

El cuarto y quinto enjuague presentan la misma característica, sin embargo, la diferencia entre ambos enjuagues es que el quinto enjuague siempre se mantiene con 100wt% de alcohol isopropílico, ya que este se va cambiando con cada proceso de micromaquinado que se le da a la muestra.

En la Fig. 5 -10 se muestra la muestra CM5 después del proceso mencionado anteriormente. Se muestra que a diferencia del proceso A en la muestra CM2, esta estructura no cuenta con la película delgada que impedía la liberación de la estructura. También presenta una pequeña formación de cristales, sin embargo, esto se redujo considerablemente en comparación con la muestra CM1.

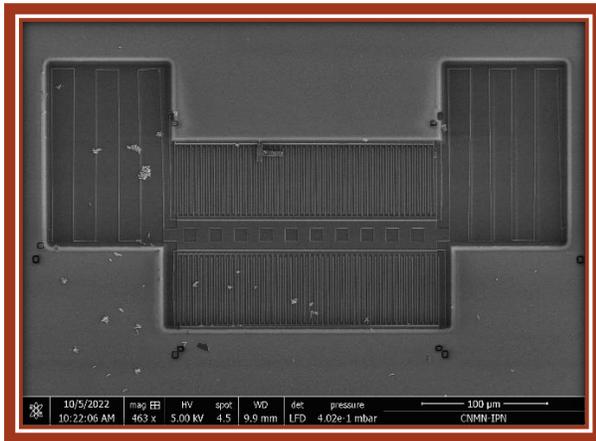


FIG. 5 - 10 ACCELERÓMETRO, MUESTRA CM5.

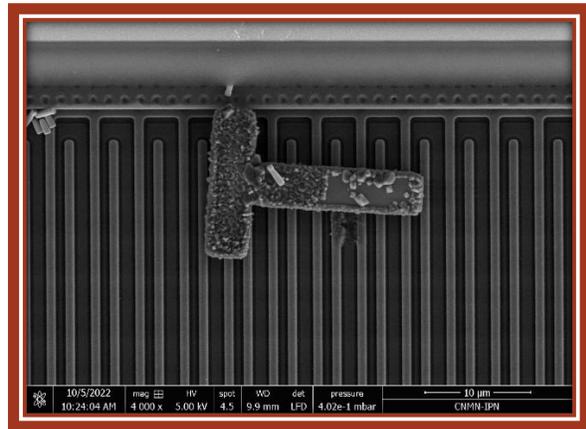


FIG. 5 - 11 LETRA "T" SOBRE DEDOS DEL ACCELERÓMETRO.

Este proceso se repitió con distintas muestras que corresponden a los chips fabricados con tecnología CMOS a través de Mosis. Los resultados de estas pruebas se muestran a continuación:

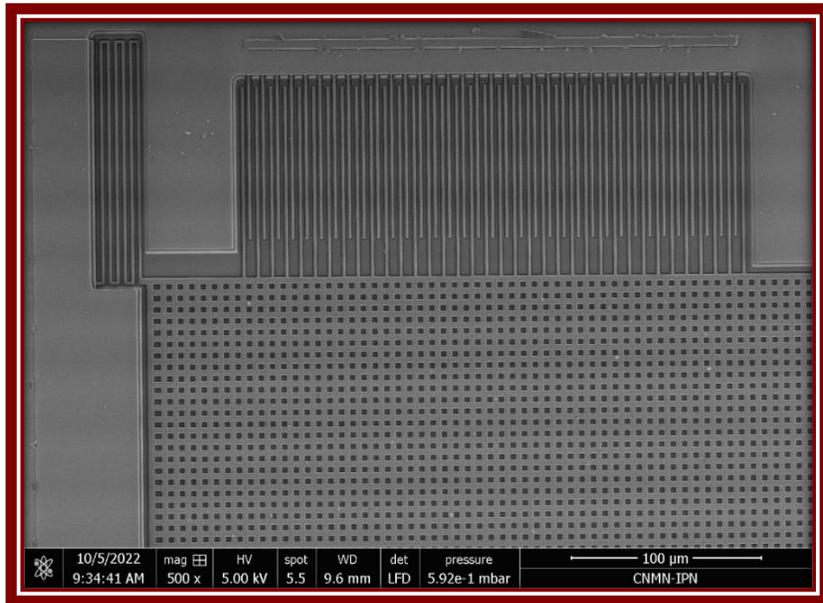


FIG. 5 - 12 ACCELERÓMETRO, MUESTRA CM6.

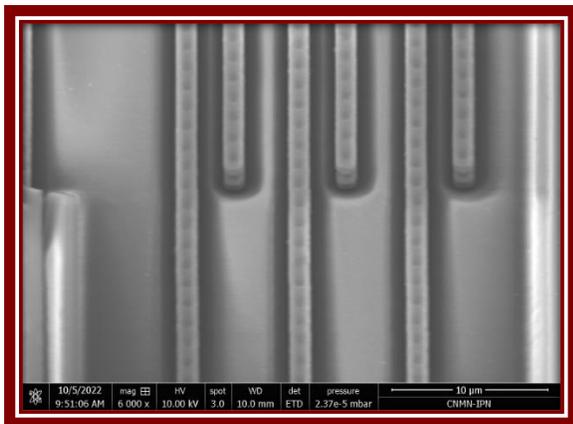


FIG. 5 - 13 CANTILÉVER, MUESTRA CM6.

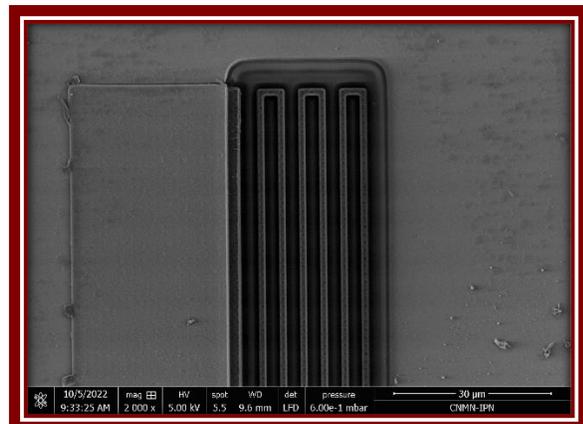
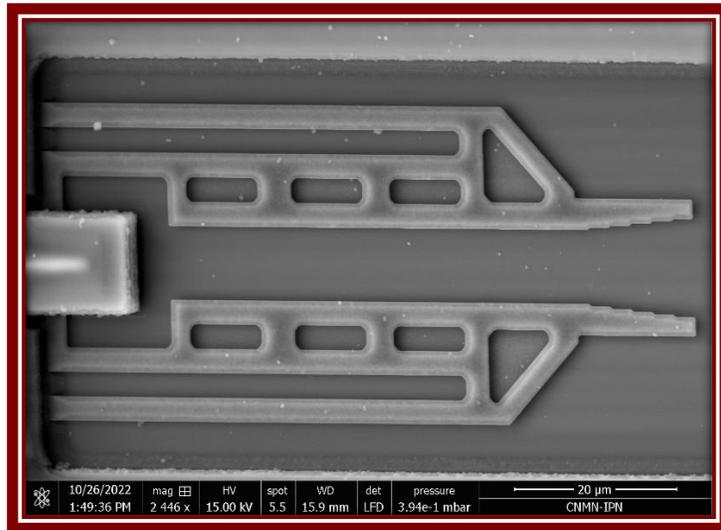


FIG. 5 - 14 RESORTE, MUESTRA CM6.

En la Fig. 5 – 12 y Fig. 5 – 13, muestran resultado de aplicar el proceso C; en estas imágenes se observa que las estructuras fueron liberadas de manera favorable, tanto los cantilévares, como el resorte se sujeta la masa.

Estas estructuras presentan una nula presencia de crecimiento de cristales, sin embargo, en la Fig. 5 -14 se observan pequeños residuos cerca del resorte.

El proceso C de micromaquinado también fue evaluado en micropinzas fabricadas con polisilicio, en la Fig. 5 -15 se muestran los resultados de la aplicación de dicho proceso.



a)

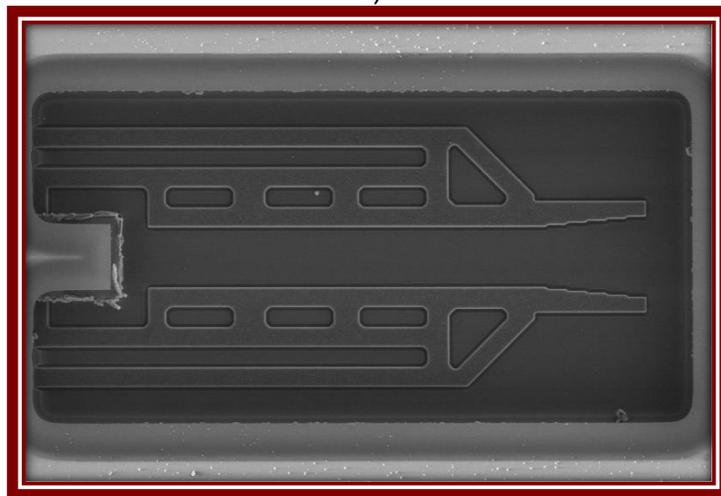


FIG. 5 - 15 MICROPINZAS.
a) Muestra CM7; b) Muestra CM8.

En la Fig. 5 – 15 se muestran dos micropinzas micromaquinadas con el proceso C, ambas pinzas tienen resultados similares, lo cual implica liberación total de la estructura y crecimiento mínimo de cristales.

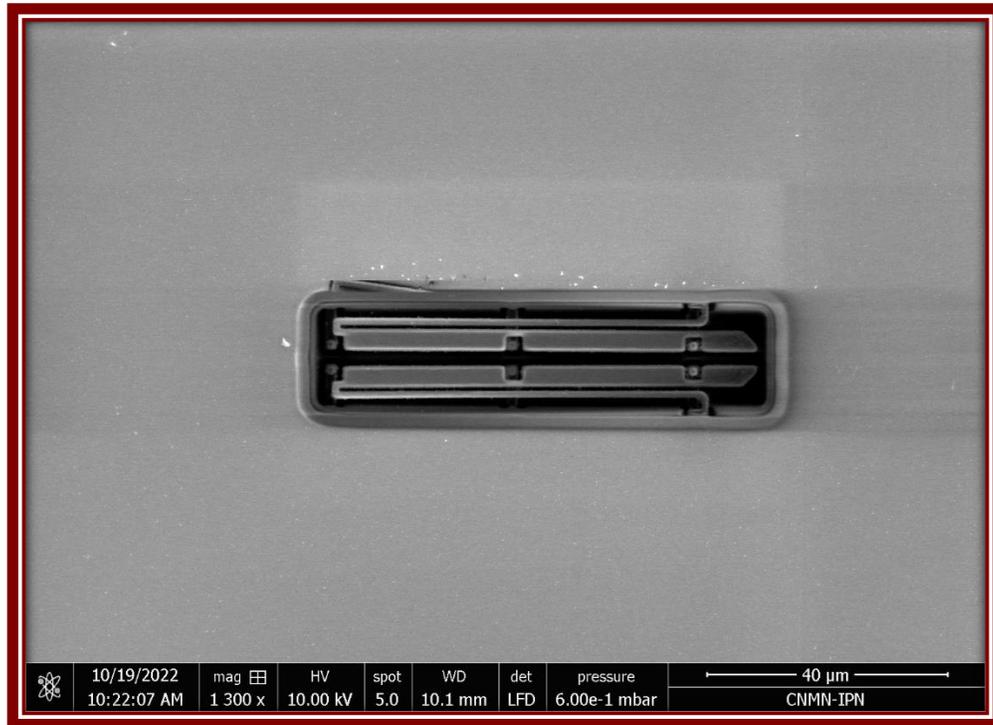


FIG. 5 - 16 MICROPINZAS METAL, MUESTRA CM8.

Las Fig. 5 – 16 y 5 – 17 muestran una micropinza micromaquinada con el proceso C. En estas figuras se muestra que el proceso es efectivo.

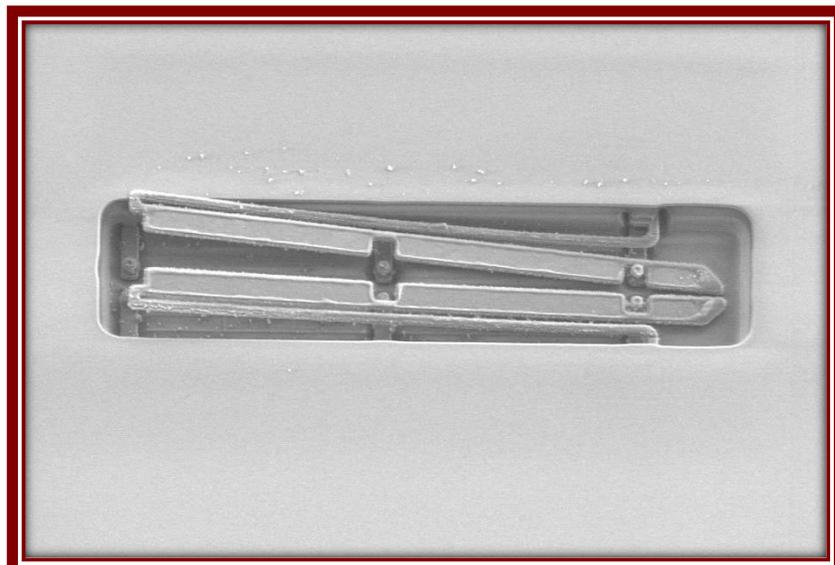


FIG. 5 - 17 MICROPINZAS METAL CON INCLINACIÓN, MUESTRA CM8.

5.5 Discusión de resultados.

El proceso A de micromaquinado no dio buenos resultados, ya que la muestra CM1 tuvo un crecimiento alto de cristales en las estructuras, así como también se vieron afectadas las estructuras, ya que algunas de éstas incluso se desprendieron después de ser liberadas. Además, los pads de esta estructura resultaron severamente dañados; estos chips se fabricaron con tecnología On-Semi® de 0.5 μm .

En cambio, el proceso utilizado para los chips fabricados en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías presentaron buenos resultados con respecto al micromaquinado, sin embargo, al ser estructuras muy delgadas éstas se rompían y se pandeaban; el crecimiento de cristales se redujo con la protección de resina.

El proceso que mejor resultados dio fue el proceso C; en esta muestra se hizo una liberación muy buena; sin embargo, aún hay crecimiento de cristales en algunas regiones, pero en comparación con las primeras muestras se puede decir que se redujo en gran medida, además de que se quitó la película delgada que impedía el micromaquinado en la muestra C2.

5.6 Conclusiones.

La fabricación de estructuras MEMS resulta una tarea compleja, cuando se desconocen algunas partes de la tecnología con la cual se fabricaron los chips; éste es el caso de las muestras CM1 y CM2, ya que en el proceso A, la muestra CM2 contaba con una película delgada hecha de una aleación desconocida, lo que provocó que se atacara con distintas soluciones, pero sin obtener resultados favorables. Cabe aclarar que, al no saber la composición exacta de esta película delgada, no es posible atacarlo con una sustancia específica, y esto podría provocar que las sustancias con las cuales se hizo el ataque fortalecieran esta película.

Sin embargo, al realizar una limpieza previa, esta capa que impedía el micromaquinado, se disolvió o en su defecto no se formó, como se mencionó anteriormente, gracias a que se contó con toda la información de la tecnología de fabricación.

Por otro lado, al tener estructuras muy delgadas, se vio que éstas presentan problemas de fabricación, ya que estas estructuras suelen romperse. Sin embargo, al realizar el grabado en las muestras CM4 se tuvo un mejor resultado cuando se hace el micromaquinado por pasos, en lugar de un solo micromaquinado largo, como es el caso de las muestras CM1, CM2 y CM5.

Capítulo VI – Conclusiones y trabajo a futuro.

6.1 Conclusiones.

La fabricación de estructuras MEMS es una actividad realmente compleja que no se limita solamente al grabado de estructuras, sino que es una serie de procedimientos, reglas y herramientas para la fabricación de estructuras y elementos necesarios para la ingeniería.

La fabricación de dispositivos MEMS no consta solamente del depósito de películas, revelado de mascarillas y grabado húmedo o seco; más bien la fabricación de dispositivos MEMS se inicia con la simulación de estructuras en distintos programas.

Se modelaron estructuras a través del programa COMSOL multiphysics, para evaluar el comportamiento de la estructura cuando ésta se encuentra liberada, y así tener una perspectiva del comportamiento real de la estructura.

Se desarrolló una base de datos extensa con estructuras de prueba de una sola capa, para la evaluación de procesos de micromaquinado superficial húmedo o seco.

Se obtuvo un proceso factible para la fabricación de estructuras MEMS de una sola capa estructural y una capa de sacrificio, así como la reducción parcial del crecimiento de cristales en estas estructuras.

Se determinó un proceso adecuado para la fabricación de estructuras MEMS en chips fabricados con tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$, con capas estructurales de aleaciones como TiN/AlCu/TiN y polisilicio.

Se obtuvieron los parámetros básicos para el desarrollo de una nueva tecnología para la fabricación de estructuras MEMS de una sola capa.

La finalidad del diseño y fabricación de estructuras formó parte importante para la evaluación de los procesos de micromaquinado; estableciendo así, parámetros básicos para el diseño de estructuras.

Las estructuras diseñadas para utilizar el proceso C de micromaquinado deben de tener una separación mínima de 5 μm (entre estructuras), así como también, la dimensión mínima de dichas estructuras debe de ser de 5 μm .

6.2 Trabajo a futuro.

El futuro de este trabajo es el desarrollo de estructuras formadas con un número mayor de capas estructurales, así como también, implementar nuevos materiales para dichas capas. Es importante recalcar que las limitaciones del número de capas estructurales depositadas están dadas por la tecnología del laboratorio.

Desarrollar estructuras complejas elaboradas con capas estructurales de distintos materiales para aplicaciones específicas en la ingeniería.

Diseñar estructuras MEMS para aplicaciones específicas y caracterizarlas.

Caracterizar las estructuras MEMS desarrolladas en este trabajo de investigación.

Unificar la tecnología CMOS y MEMS, aplicando el proceso de fabricación desarrollado en este trabajo de investigación.

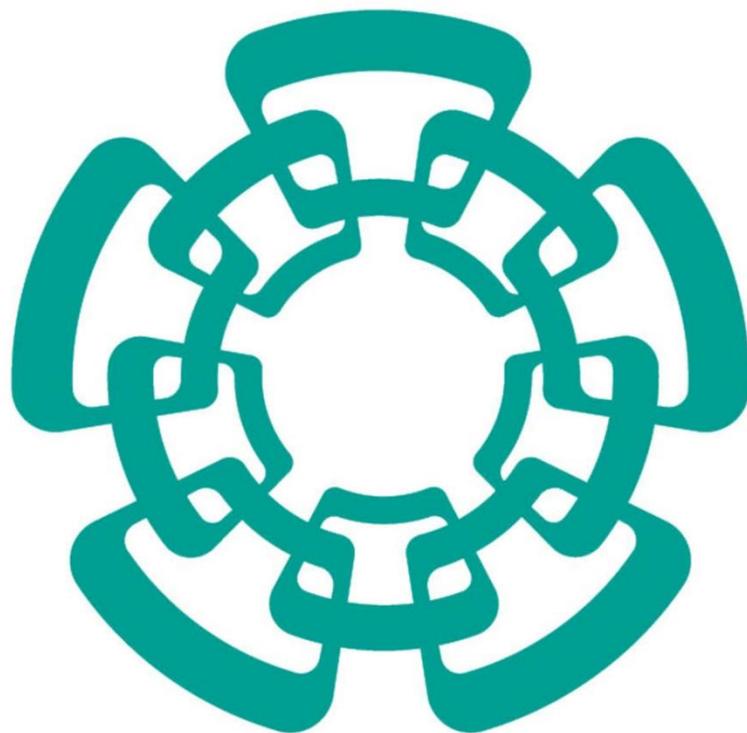
Referencias.

- [1] Adams, T. M., & Layton, R. A. (2010). *Introductory Mems. Fabrication and applications*.
- [2] Madou, M. J. (2018). *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology, three-volume set*.
- [3] Kaajakari, V. (2009). *Practical mems* (pp. 223-229). Las Vegas: Small Gear Publishing.
- [4] Baglio, S., Castorina, S., & Savalli, N. (2008). *Scaling issues and design of MEMS*. John Wiley & Sons.
- [5] <https://www.sandia.gov/mesa/microelectromechanical-systems-mems/>
- [6] <https://research.ece.cmu.edu/~mems/>
- [7] <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Areas/MEMS/>
- [8] <http://www.memscap.com/>
- [9] <https://www-elec.inaoep.mx/laboratorios/centro-de-diseno-de-mems>
- [10] <https://www.ipn.mx/nanocentro/>
- [11] <https://www.analog.com/en/index.html>
- [12] Sedky, S. (2005). *Post-processing techniques for integrated MEMS*. Artech.
- [13] Bhushan, B., & Baumann. (2007). *Springer handbook of nanotechnology* (Vol. 2). B. Bhushan (Ed.). Berlin: Springer.
- [14] Stout, P. J., Yang, H. Q., Dionne, P., Leonard, A., Tan, Z., Przekwas, A. J., & Krishnan, A. (1999, March). CFD-ACE+: A CAD system for simulation and modeling of MEMS. In *Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS* (Vol. 3680, pp. 328-339). SPIE.

- [15] Slattery, A. D., Blanch, A. J., Shearer, C. J., Stapleton, A. J., Goreham, R. V., Harmer, S. L., ... & Gibson, C. T. (2019). Characterisation of the material and mechanical properties of atomic force microscope cantilevers with a plan-view trapezoidal geometry. *Applied Sciences*, 9(13), 2604.
- [16] Ge, C., & Cretu, E. (2017). MEMS transducers low-cost fabrication using SU-8 in a sacrificial layer-free process. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(4), 045002.
- [17] Kazmi, S. N. R., Salm, C., & Schmitz, J. (2013, March). Mechanical resonators on CMOS for integrated passive band pass filters. In *2013 14th International Conference on Ultimate Integration on Silicon (ULIS)* (pp. 193-196). IEEE.
- [18] Pallay, M., & Towfighian, S. (2017). Parametrically excited electrostatic MEMS cantilever beam with flexible support. *Journal of vibration and acoustics*, 139(2).
- [19] Perello-Roig, R., Verd, J., Bota, S., & Segura, J. (2020). Impact of Fluid Flow on CMOS-MEMS Resonators Oriented to Gas Sensing. *Sensors*, 20(17), 4663.
- [20] Bargiel, S., Baranski, M., Wiemer, M., Frömel, J., Wang, W. S., & Gorecki, C. (2019). Technological Platform for Vertical Multi-Wafer Integration of Microscanners and Micro-Optical Components. *Micromachines*, 10(3), 185.
- [21] Laszczyk, K., Bargiel, S., Gorecki, C., Krężel, J., Dziuban, P., Kujawińska, M., ... & Frank, S. (2010). A two directional electrostatic comb-drive X–Y micro-stage for MOEMS applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 163(1), 255-265.
- [22] Krężel, J., Laszczyk, K., Bargiel, S., Gorecki, C., Kujawińska, M., Parriaux, O., & Tonchev, S. (2010, May). Simulation and in-plane movement characterization of 2D MEMS platform. In *Optical Micro-and Nanometrology III* (Vol. 7718, pp. 124-131). SPIE.
- [23] Bandaru, S., & Deb, K. (2015, March). Temporal innovization: Evolution of design principles using multi-objective optimization. In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (pp. 79-93). Springer, Cham.

- [24] Meenatchisundaram, S., Kulkarni, S. M., Venkateswaran, P. R., Uma, G., & Umapathy, M. (2009). Simulation and optimisation of microresonators using sugar and multi-objective genetic algorithm (MOGA). *Modelling, Measurement and Control A*, 82(3-4), 32-47.
- [25] Ezema, F. I., Lokhande, C. D., & Jose, R. (Eds.). (2021). *Chemically Deposited Nanocrystalline Metal Oxide Thin Films: Synthesis, Characterizations, and Applications*. Springer International Publishing.
- [26] Rauschenbach, B. (2022). Low-Energy Ion Beam Bombardment-Induced Nanostructures. In *Low-Energy Ion Irradiation of Materials* (pp. 305-405). Springer, Cham.
- [27] Estrada, M., & Escobosa, A. (2012). *Tecnología de fabricación de microcircuitos: aspectos básicos: tecnología de microcircuitos*. Editorial Académica Española.
- [28] Ghodssi, R., & Lin, P. (Eds.). (2011). *MEMS materials and processes handbook* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- [29] Vigna, B., Ferrari, P., Villa, F. F., Lasalandra, E., & Zerbini, S. (2022). Correction to: Silicon Sensors and Actuators. In *Silicon Sensors and Actuators* (pp. C1-C1). Springer, Cham.
- [30] Abarca-Jiménez, G. S., Romero-Paredes Rubio, G., Reyes-Barranca, M. A., Alemán-Arce, M. A., Munguía-Cervantes, J. E., & Mendoza-Acevedo, S. (2018). Surface micromachining of a micro electromechanical inertial transducer based on commercially available Floating Gate Transistor technology. *Superficies y vacío*, 31(3), 48-51.
- [31] <https://transene.com/sio2/#silox>

Anexos



Cinvestav

DANVERS INDUSTRIAL PARK
 10 ELECTRONICS AVENUE
 DANVERS, MA 01923
 TEL: (978) 777-7860 Fax: 978-739-5640
 www.transene.com

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

SECTION I. MATERIAL IDENTIFICATION

Material Name: Vapox III : **SILOX VAPOX III**
Other Designations: Ammonia Bifluoride Solution
 Buffered Oxide Etchant

Chemical Family: Inorganic acid mixture **Trade Name:** Vapox III; SILOX VAPOX III

SECTION II. INGREDIENTS AND HAZARDS

	<u>CAS. NUMBER</u>	<u>%</u>	<u>HAZARD DATA</u> <u>Toxicity (mg/M³)</u>
Hydrofluoric acid, (HF)	7664-39-3	1-5	3 ppm OSHA
Ammonium Fluoride (NH ₄ F)	12125-01-9	30-35	2.5 mg/M ³
Distilled water		>50	
Acetic Acid	64-19-7	5-10	10 PPM

SECTION III. PHYSICAL DATA

Boiling point @ latm:	218°F	Specific gravity, 20/4C:	1.12
Vapor pressure @ 15° C, mmHg:	400	Evap. Rate (BuAc=1):	< 0.5
Vapor density (Air=1):	1.3	Volatiles, %:	55-60
Water solubility @ 20° C:	Complete	Molecular weight:	N/A

SECTION IV. FIRE AND EXPLOSION DATA

		LOWER	UPPER
Flash point and method	Autoignition temp. deg. C	(Flammability limits in air)	
Non-flammable	NA	NA	NA

Extinguishing media: Use water or carbon dioxide on fires in which HF is involved. In cases of fire, the sealed container can be kept cool by spraying with water. Do not apply water to leaking containers.

Special fire fighting procedures: Wear chemically retardant gear and NIOSH approved self-contained breathing apparatus. Keep up wind of fire and avoid getting water in containers, as the acid reacts violently with water causing generation of heat and spattering.

SECTION V. REACTIVITY DATA

Stability: Stable

Conditions to avoid: Contact with metals liberates hydrogen gas. It attacks glass and reacts with silica to produce silicon tetrafluoride, a hazardous and colorless gas

Standard Operating Procedure: Aluminum Etch

Principle of Operation

To remove aluminum from a substrate – patterned or unpatterned.

Material Requirements

Equipment: substrate, glass Petri dish or beaker (for etchant), glass beaker (for rinse) and stainless steel tweezers

Chemicals: Aluminum Etchant (contains Phosphoric Acid, Nitric Acid, Acetic Acid and water)

- Aluminum Etchant Hazards
 - o Chemical is corrosive to the eyes, skin and mucous membranes. Causes irritation and burns. Vapors severely irritate the respiratory tract.
 - o Do not mix with strong oxidants or organic materials.
 - o Do not heat above 50°C.

Personal Protective Equipment: Trionic gloves on top of nitrile gloves, apron, safety glasses and face-shield

Procedure

Estimated Time:

Aluminum Etch

1. Rinse both beakers with DI water prior to beginning the process.
2. Stand the beaker to be used for rinsing on a few fab wipes in the hood and fill it with DI water so that the water level will cover the entire substrate.
3. Get a glass beaker that will fit your samples for processing – you should find one labeled “Aluminum Etchant” on the shelves. Place it on fab wipes in the hood.
4. Carefully pour some of the Aluminum Etchant into the glass beaker so that there is enough liquid to cover your submerged sample.
5. If you plan to heat the etch, set up the hotplate in the hood at 60°C. *Expect the temperature of the bath to be at least 10°C lower than the temperature of the hotplate.*
6. Place the beaker of Aluminum Etchant on the hotplate and bring it up to temperature.
7. Calculate the etch time for your sample. You will need to know the thickness of your aluminum layer.
 - a. At 25°C, the aluminum will etch at a rate of approximately 180 nm/min.
 - b. At 50°C, the aluminum will etch at a rate of approximately 660 nm/min.
8. Put your sample into the etchant and soak for the appropriate amount of time calculated in the previous step. Agitation of the Petri dish will accelerate the etch.