

*Estudio de las propiedades termo mecánicas del Polisilicio para su aplicación en sensores inteligentes.* 

Por:

M.C. Fernando Julián Quiñones Novelo.

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de

## DOCTORADO EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA.

En el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Junio 2014 Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Wilfrido Calleja Arriaga** Investigador titular del INAOE

y Dr. Francisco Javier de la Hidalga Wade. Investigador titular del INAOE

### ©INAOE 2014

Derechos Reservados

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



## Resumen.

Con el propósito de fabricar Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) de alta calidad y de alto rendimiento, es de suma importancia controlar y cuantificar, las principales propiedades físicas de los materiales que intervienen en éstos dispositivos. En general, cualquier tipo de micro actuador o sensor aprovecha un efecto físico para funcionar.

Durante el diseño de un dispositivo MEMS, lo que se busca es optimizar el desempeño del sensor/actuador; maximizando los efectos físicos que aprovecha dicha estructura. Los efectos físicos comúnmente utilizados son: *Efecto electrostático, magnético, electro-térmico, piezoeléctrico y piezoresistivo*. A su vez, estos efectos físicos, son consecuencia de las *propiedades físicas del material*; como por ejemplo: la resistividad eléctrica ( $\rho_e$ ), coeficiente de expansión térmica lineal (CTE), conductividad térmica ( $\kappa$ ), calor especifico ( $C_p$ ), módulo de elasticidad (E) y la densidad de material( $\rho$ ).

La presente tesis presenta el diseño y el proceso de fabricación del Chip llamado PolyMEMS VII; que permite medir las propiedades termo-mecánicas en películas de Polysilicio. Se propone un esquema de medición confiable, sencillo y de bajo costo para la caracterización mecánica. Así mismo se reporta la caracterización mecánica de las siguientes propiedades: Módulo de Young (*E*), esfuerzo residual de tensión-compresión mecánica ( $\pm \sigma$ ), gradiente de esfuerzo residual mecánico ( $\pm \Delta \varepsilon$ ).

i

## Abstract.

In order to manufacture Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), high quality, high performance, it is important to check and quantify the main physical properties of the materials involved on these devices. In general any type of micro actuator or sensor uses a physical effect, to work.

During the design of a MEMS device, the goal is to improve the performance of the sensor/actuator; maximizing physical effects of the structure. Physical effects commonly used are: electrostatic, magnetic, electro-thermal, piezoelectric and piezoresistive effect. In turn, these physical effects are a consequence of the physical properties of the material; as for example the electrical resistivity ( $\rho$ e), linear coefficient thermal expansion (CTE), thermal conductivity ( $\kappa$ ), specific heat (Cp), modulus of elasticity (E) and the mass density ( $\rho$ ).

This thesis presents the design and manufacturing process of Chip called PolyMEMS VII; to measure the thermo-mechanical properties of Polysilicon film. A reliable, simple and inexpensive scheme, for mechanical characterization is proposed. Also the characterization of mechanical properties like Young's modulus (E), residual tensile- compression mechanical stress ( $\pm \sigma$ ) and residual mechanical stress gradient ( $\pm \Delta \epsilon$ ) is reported.

## Dedicado a:

Mi esposa Mariana, a mis padres Liborio y Celmy, a mis hermanos Gerardo y Andrés.

## Agradecimientos.

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

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

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

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

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

## Contenido

Resumen.	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Capítulo 1	1
1.1. Antecedentes y justificación.	1
1.2. Objetivo	5
1.3. Marco teórico.	6
1.3.1. Módulo de Young	6
1.3.1.1. Técnica de medición y sus consideraciones	8
1.3.1.2. Esquema de medición	12
1.3.2. Esfuerzos residuales.	14
1.3.3. Conductividad Térmica y calor específico	16
1.3.3.1 Técnica de medición mediante el método 3ω.	19
Capítulo 2.	25
2.1 Introducción.	25
2.2. El monitor de esfuerzo mecánico de compresión	25
2.3. El Monitor de gradientes de esfuerzo residual y frecuencia de resonancia	31
2.4. Estructuras para medir las propiedades térmicas.	38
2.5. Diseño del chip PolyMEMS VII	40
Capítulo 3	43
3.1 Introducción.	43
3.2 Descripción simplificada del proceso de fabricación del chip PolyMEMS VII	44
3.3. Descripción de los Pasos 2 al 4	45
3.4. Descripción del Paso 5.	46
3.5. Descripción de los Pasos 6 al 9	48
3.6. Descripción de los Pasos 10 al 13	51
3.7. Descripción de los Paso 14, 15 y 16	52
Capítulo 4	57
4.1 Introducción.	57
4.2. Resultados generales y análisis cualitativo.	57

4.3. Esquema de medición para el módulo de Young	61
4.3.1. Sistema óptico-mecánico	62
4.3.2. Tarjeta de adquisición de datos	63
4.3.3. Generador de funciones y resonador piezoeléctrico	63
4.3.4. PC y software de control.	64
4.4. Medición del Módulo de Young E.	65
4.5. Medición de los esfuerzos mecánicos residuales.	70
Capítulo 5	73
5.1. Conclusiones.	73
5.2. Trabajo Futuro	75

## Capítulo 1. Introducción.

### 1.1. Antecedentes y justificación.

La industria de los Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS, por sus siglas en ingles), ha detonado en sectores privados, principalmente por el impacto económico que puede generar dicha tecnología. La tecnología de los MEMS incluye circuitos integrados con dispositivos sensores y actuadores, todo integrado en un solo bloque monolítico o substrato. Esta integración optimiza el desempeño de los dispositivos así como también, el costo de fabricación, de empaquetado y aplicación de estos dispositivos [1]. Sin embargo, la integración de la electrónica CMOS con dispositivos Electro-Mecánicos plantea una problemática importante en la tecnología de fabricación pues existen muy pocas empresas y laboratorios en el mundo que ofrecen este nivel de integración.

Como ejemplo tenemos la tecnología SUMMiT V de los laboratorios Sandia y la tecnología PolyMUMPS de la compañía MEMSCAP. Dichas tecnologías son líderes mundiales, y se ofrecen en el mercado a diseñadores, universidades y empresas interesadas en desarrollar MEMS. El proceso SUMMiT V<sup>TM</sup> consiste de 5 capas de Silicio Policristalino (Polisilicio o Poly-si) micro maquinado, 4 capas de material de sacrificio y 1 capa de metal. Utiliza 14 mascarillas para generar hasta 9 niveles de capas estructurales. La dimensión mínima permitida en el proceso SUMMiT V<sup>TM</sup> es de 2µm [2]. Por otra parte, PolyMUMPS<sup>TM</sup> es un proceso que utiliza 3 capas de Polisilicio micro maquinado, 2 capas de material de sacrificio y una capa de metal. Además utiliza 8 mascarillas, para generar 7 niveles de capas estructurales. La dimensión mínima permisible en el proceso PolyMUMPS<sup>TM</sup> es también de 2µm [3]. Ambos ofrecen el servicio de fabricación y manufactura de dispositivos MEMS. Sus servicios son ofertados a través de programas o convenios entre las empresas e instituciones o directamente por contrato en el caso de MEMSCAP.

En este contexto, el INAOE por su parte, con la inauguración del Laboratorio de Innovación en MEMS (LI-MEMS), se adquiere el compromiso y la capacidad para desarrollar tecnologías que permitan fabricar circuitos integrados, sensores y actuadores;

1

acordes con la industria de semiconductores actual. Desde el año 2008 se ha estado desarrollado un proceso de fabricación de microcomponentes denominado PolyMEMS-INAOE® [4]. De esta forma, el Laboratorio de Innovación en MEMS ofrecerá los mismos servicios a nivel nacional, e incluso internacional, ofertando su proceso. Actualmente este proceso se encuentra en sus fases de maduración y conformación final. El proceso tiene el propósito de fabricar microestructuras mecánicas de Polisilicio mediante micro maquinado superficial; está proyectado para ofrecer 3 niveles de Poly-si como material estructural, 3 capas de vidrio de fosforo-silicato (PSG) como material de sacrificio, una capa de metalización de Aluminio (Al) u Oro (Au); además se utilizan dióxido de silicio (SiO2) y nitruro de silicio (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) como aislantes eléctricos. En la tabla 1.1 se listan las 9 capas proyectadas para el proceso PolyMEMS-INAOE [4]. Asimismo, se utilizan 9 niveles de mascarillas. La dimensión mínima proyectada es de 1 micra (dimensión mínima requerida para fabricar resonadores que se utilizarán como elementos de referencia en esta tecnología). Los grosores de las películas serán de 0.5, 2.0 y 3.0 micras para el primer, segundo y tercer nivel de Poly-si respectivamente. Las estructuras son fabricadas sobre obleas de silicio cristalino con orientación (100) de 2 pulgadas de diámetro como soporte mecánico [4, 5].

mostrando su función, grosor y mnemonico de capa [4].				
Material	Función	Grosor[µm]	Mnemónico	
SiO2	Aislante Eléctrico	0.1	óxido	
Si3N4	Aislante Eléctrico	0.1	nitruro	
poly-Si	poly-Si Material Estructural"1"	0.5	poly-Si 1	
PSG	Soporte Mecánico Temporal "1"	2.0	PSG 1	
poly-Si	Material Estructural '2'	2.0	poly-Si 2	
PSG	Soporte Mecánico Temporal "2"	1.5	PSG 2	
poly-Si	Material Estructural '3'	3	poly-Si 3	
PSG	Dieléctrico	1.5	PSG 3	
Al	Material de Interconexión Eléctrica	0.5	metal	

 Tabla 1.1. Materiales utilizados en el proceso de fabricación PolyMEMS-INAOE,

 mostrando su función, grosor y mnemónico de cana [4].

Con el proceso PolyMEMS-INAOE ya se ha conseguido fabricar con éxito micro estructuras funcionales de dos niveles de Poly-si estructural (poly-Si 2 y poly-Si 3). Asimismo, con esta tecnología se diseñaron los chips PolyMEMS III, V, V-B y VI que fueron documentados en las tesis de maestría [4, 5, 6] precedentes a este trabajo. En [5] se diseñaron y fabricaron micro actuadores, con la capacidad de desarrollar movimiento mecánico aprovechando el efecto Joule (efecto termo-eléctrico). Se logró fabricar microestructuras funcionales con dimensiones mínimas de 5 micras, y fueron incluidos en los chips

PolyMEMS en sus versiones V y V-B. Estos chips fueron montados y alambrados en bases especiales para realizarles pruebas eléctricas; y también se les realizó un análisis de esfuerzos residuales. Así mismo en [6], se utilizaron los niveles poly-Si 2 y 3 del proceso PolyMEMS-INAOE, para desarrollar un sensor de presión capacitivo para aplicaciones médicas. En dicho trabajo se fabricó el chip PolyMEMS-VI en cuyo diseño se incluyeron diferentes variantes del sensor. Con estos precedentes es claro que en el futuro se diseñarán los próximos chips PolyMEMS, en los que se espera desplegar nuevos diseños de microestructuras e integración de CMOS-MEMS.

Por otro lado, este tipo de sensores y actuadores basan su funcionamiento en diferentes efectos físicos. Por ejemplo los micro actuadores en [5] aprovechan el efecto Joule como ya se ha mencionado, mientras que en [6] los sensores de presión basan su funcionamiento en el efecto electroestático (capacitancia variable). En general, cualquier tipo de micro actuador o sensor aprovecha un efecto físico para su funcionamiento. Durante el diseño de un dispositivo MEMS, lo que se busca es optimizar el desempeño del sensor/actuador; maximizando los efectos físicos que aprovecha dicha estructura. Los efectos físicos comúnmente utilizados son: *Efecto electrostático, magnético, electro-térmico, piezoeléctrico y piezoresistivo* [7]. A su vez, estos efectos físicos, son consecuencia de las *propiedades físicas del material*; como por ejemplo las estructuras desarrolladas en [5], involucra las propiedades físicas como: la resistividad eléctrica ( $\rho_e$ ), coeficiente de expansión térmica lineal (CTE), conductividad térmica ( $\kappa$ ), calor especifico ( $C_p$ ), módulo de elasticidad (E) y la densidad del material ( $\rho$ ). Por ello nos centraremos en las propiedades físicas de los materiales, porque es importante controlarlas y caracterizarlas para diseñar y fabricar estructuras MEMS de alta calidad y de alto rendimiento.

El proceso PolyMEMS-INAOE emplea módulos de fabricación estándar de la industria, y por lo tanto se espera, que los materiales fabricados (como el Poli-si) posean propiedades físicas similares a las propiedades de los materiales fabricados con SUMMIT-V o PolyMUMPS; sin embargo es importante caracterizar las propiedades para tener la certeza de la calidad del proceso de fabricación. Por ello los chips fabricados con el proceso PolyMEMS-INAOE, son caracterizados cualitativa y cuantitativamente. Las propiedades que se caracterizan sistemáticamente en el proceso son: resistividad eléctrica ( $\rho_e$ ), capacitancia eléctrica (*C*), rugosidad superficial, nivel de dopado, primordialmente. Sin embargo el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young (*E*), al igual que la conductividad térmica ( $\kappa$ ) y calor específico ( $C_p$ ), no se han caracterizado. Esto se debe a la falta de una propuesta en el método de caracterización de estas propiedades. Estas propiedades son importantes porque con ellas se caracterizan las respuestas termo-mecánicas que tendrán los actuadores desarrollados en [5], los sensores en [6] y en estructuras que se desarrollen en un futuro. Normalmente, la caracterización de las propiedades físicas se logra mediante la fabricación de un chip que contiene estructuras diseñadas para la medición de un conjunto de propiedades físicas mecánicas, eléctricas o térmicas.

En este contexto, de la necesidad de caracterizar las propiedades termo mecánicas del Poly-si  $(E, \kappa, C_p)$  surge el presente trabajo de tesis doctoral. Este se enfocará en proponer un método de medición confiable y de bajo costo para la caracterización; así mismo se propone el diseño y procedimiento de fabricación de un chip de pruebas, que contenga estructuras orientadas a la medición de dichas propiedades.

## 1.2. Objetivo.

El objetivo general es diseñar y fabricar un chip de pruebas para la medición de las propiedades termo mecánicas del Poly-si: Módulo de Young (*E*), conductividad térmica ( $\kappa$ ) y calor específico ( $C_p$ ); utilizando la tecnología de fabricación PolyMEMS-INAOE. Así mismo, proponer los métodos de medición que se adecúen a los criterios de bajo costo, sencillez de implementación y que empleen estructuras de prueba del menor grado de complejidad posible.

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

- Proponer un diseño sencillo y funcional del chip (que se llamará PolyMEMS-VII), para la fabricación y caracterización del Polisilicio.
- Revisar los módulos de fabricación del proceso PolyMEMS-INAOE, y de ser necesario, modificar y optimizar, los módulos que convengan para fabricar con éxito el chip.
- Proponer y montar un esquema de medición de bajo costo, para la caracterización mecánica del Polisilicio. El trabajo se centrará en la medición del módulo de elasticidad y complementará la caracterización, con las mediciones de esfuerzos mecánicos y gradientes de esfuerzo mecánico.
- Proponer las estructuras que servirán para medir las propiedades térmicas; así como también proponer el método de medición más adecuado.
- Reportar los resultados obtenidos y compararlos con lo publicado en la literatura.

#### 1.3. Marco teórico.

En esta sección se presentan los conceptos teóricos de las propiedades mecánicas del Polisilicio, así como los métodos de medición. Primero, se considera el módulo de Young y se presentan el método de caracterización que se propone en este trabajo. Enseguida se presenta los conceptos teóricos de los esfuerzos mecánicos residuales: estiramiento, compresión y gradiente. Por último se presentan los conceptos teóricos sobre las propiedades térmicas y la metodología para su medición.

#### **1.3.1. Módulo de Young.**

El módulo de Young es una propiedad física, que sirve para caracterizar mecánicamente un material. Esta medida cuantifica la elasticidad que tiene un material cuando es sometido a una deformación mecánica provocada por una fuerza externa. Formalmente el módulo de Young se define como la pendiente en la región lineal de la razón entre la tensión mecánica uniaxial (eje x) y la deformación mecánica uniaxial.



Figura 1.1 Representación del módulo de Young. Región elástica entre los puntos 1-2, caracterizado por la naturaleza estructural del material.

Como se observa en la figura 1.1, el valor del módulo de Young permanecerá sin cambio (región entre los puntos 1-2), siempre que los valores de tensión y deformación mecánica uniaxial no sobrepasen el límite Elástico (punto 3). El límite Elástico es el valor máximo de tensión y deformación que un material puede soportar antes de que ya no pueda restituirse a su forma original. Por arriba de este límite el material deja de ser elástico y comienza a comportarse de forma plástica, aunque existen materiales llamados quebradizos que al

sobrepasar el límite elástico se rompen. La expresión matemática del módulo de elasticidad se muestra en la ecuación 1.1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1.1}$$

Donde *E* es el módulo de Young,  $\sigma$  es la tensión uniaxial (conocido en inglés como Stress uniaxial; unidades de fuerza/área),  $\varepsilon$  es la deformación uniaxial (Strain uniaxial; unidades de longitud/longitud).

El módulo de Young es un parámetro mecánico importante en el diseño y fabricación de estructuras mecánicas. Siempre que se diseña una estructura que por su funcionamiento estará sometida a esfuerzos ó deformaciones mecánicas el módulo de Young es incluido dentro de las ecuaciones que modelan dicha estructura. No importa que las dimensiones de la estructura a diseñar, sean macroscópicas o microscópicas el módulo de Young caracteriza su comportamiento elástico.

Si nos referimos a estructuras microscópicas cómo las microestructuras MEMS, el módulo de Young debe conocerse perfectamente para poder diseñar y caracterizar dichas estructuras. Para el caso del Polisilicio (Poly-si) que es el material principal de la tecnología PolyMEMS-INAOE, su módulo de Young (MY) es altamente dependiente de la orientación cristalina preferente. Se ha reportado que una orientación preferente en el grano del Poly-si de <100>, causará que su MY se encuentre en valores cercanos a 150GPa. Mientras que para una orientación de <111> el valor del MY estará cercano a 170Gpa [7]. La orientación cristalina depende de la temperatura de depósito y de la temperatura de recocido. A una temperatura de depósito que interco-cristales con una estructura columnar y una orientación cristalina preferente de <100>. Al recocer el Poly-si a una temperatura de 1000°C, los micro-cristales se reestructuran y adquieren una orientación preferente <111> [7]. Cabe mencionar que la frontera de grano del Poly-si no tiene un efecto significativo en su MY. Por otra parte, la aproximación uniaxial de *E* mostrada en la ecuación 1.1, puede realizarse para todas las demás direcciones, debido a la combinación de simetría cúbica y a la ortoplanaridad de los micro-cristales en el Poly-si [8].

Por otro lado, cuando se diseñan micro-estructuras mecánicas, el MY de la película estructural juega un papel importante; debido a que una elección errónea en su valor puede

influir negativamente en el análisis del diseño de un proyecto o dispositivo MEMS. En la tabla 1.2 se muestra los valores de los MY para los materiales más utilizados en la fabricación de MEMS. Para el Poly-si se reportan valores que van desde 130 a 190GPa; por lo que se dispone de un amplio rango para elegir, lo que eleva la probabilidad del error, en lo que a diseño mecánico se refiere. Generalmente los diseñadores toman el valor medio típico de 160GPa, ya que se supone que las películas de Poly-si se fabrican con tecnología estándar de la industria; y se espera que el MY esté cercano a este valor. Sin embargo, al conocer el valor exacto, se puede predecir mejor el comportamiento mecánico de la estructura que se diseña. Por ello es importante implementar una técnica para medir dicho parámetro y poder caracterizar los diversos materiales que se fabrican en el laboratorio.

para los materiales más utilizados en la fabricación de MEMS.				
Oxido de Silicio				
(Crecido Térmicamente)	50 a 80GPa	[9, 10]		
SIU2 Nitruro de Silicio				
(PECVD)	85 a 230GPa	[10, 11]		
Silicio Cristalino	120 a 220GPa	[8, 12, 13, 14]		
Polisilicio	130 a 190GPa	[8, 12, 13, 14]		

Tabla 1.2 Valores reportados del Módulo de Young

A continuación se presenta la técnica por rastreo de frecuencias de resonancia, para medir el MY de las películas delgadas de Poly-si. También se propone un esquema de instrumentación para aplicar esta técnica.

### **1.3.1.1.** Técnica de medición y sus consideraciones.

Diferentes técnicas se emplean para medir el módulo de Young; las técnicas más utilizadas se listan en la tabla 1.3. La mayoría de los métodos requieren de equipos especializados y costosos como por ejemplo, la técnica por indentación mecánica instrumentada [15, 16], la técnica por tensión-deformación de muestras [17, 18] y la técnica por rastreo de frecuencias de resonancia [19, 20, 21,]. Algunas otras, aplican las técnicas anteriores, con ciertas modificaciones en los instrumentos de medición [22, 23], o fabrican estructuras de prueba complejas para realizar las mediciones del módulo de Young [19, 20, 21, 23, 24, 25]. En la presente tesis se eligió la técnica por rastreo de frecuencias de resonancia por algunos aspectos básicos a favor. Esta técnica permite montar un esquema de medición con instrumentos poco sofisticados y de bajo costo. Con la adecuada elección del excitador mecánico no es necesario realizar una calibración previa (utilizando por ejemplo patrones de referencia) en el esquema de medición. Así mismo es posible utilizar diferentes fuentes de excitación mecánica como por ejemplo: excitación foto-térmica, acústica, mecánica y electrostática [11]. De acuerdo a las capacidades de fabricación del laboratorio del INAOE, se pueden diseñar estructuras apropiadas para esta técnica; que permiten obtener de manera confiable la magnitud del MY del Poly-si.

Técnicas empleadas	Ventajas	Desventajas	Referencias
Indentación mecánica instrumentada	<ul> <li>La medición se realiza directamente sobre películas depositadas.</li> <li>No se requiere de la liberación del material.</li> <li>No se requiere del diseño de estructuras especiales.</li> </ul>	<ul> <li>Equipo especializado y costoso.</li> <li>Requiere de puntas especiales con formas definidas para poder realizar la medición.</li> </ul>	[15, 16]
Prueba por tensión- deformación	<ul> <li>Se aplica en películas depositadas.</li> <li>La medición es más certera al medir directamente la deformación de la película.</li> </ul>	<ul> <li>Requiere de liberación de las películas depositadas.</li> <li>Es necesario el diseño de estructuras con formas definidas.</li> </ul>	[17, 18]
Frecuencia de resonancia	<ul> <li>Con el esquema de medición adecuado, se omite la calibración de los equipos.</li> <li>Se pueden utilizar diferentes fuentes de excitación mecánica.</li> </ul>	<ul> <li>Equipo especializado.</li> <li>Requiere del diseño y fabricación de estructuras especiales.</li> </ul>	[19, 20, 21]

Tabla 1.3 Técnicas	de medición	más comunes	para la n	nedición d	el módulo	de Young.
	ac meansion	mas contancs	puluiui	inculcion a	cr modulo -	ac roung.

Mediante esta técnica es posible medir la frecuencia de resonancia de una estructura. Un material que es capaz de vibrar y se somete a la acción de una fuerza periódica puede experimentar un fenómeno llamado resonancia mecánica. La resonancia mecánica se presenta cuando el periodo de vibración de la fuerza coincide con el periodo de vibración del material. Cuando dicho material comienza a vibrar y entra en resonancia con la fuerza aplicada, la amplitud de sus vibraciones se irán haciendo cada vez más grandes.

La técnica por rastreo de frecuencias de resonancia, consiste en hacer vibrar la estructura (generalmente se usan puentes o trampolines voladizos) mediante un excitador mecánico; mientras se realiza un barrido de frecuencias se mide la amplitud de vibración de la estructura. Al final de la prueba se identifica el valor de frecuencia a la cual la estructura entró en

resonancia (se identifica la mayor amplitud de vibración). La frecuencia de resonancia de la estructura, está relacionada con su módulo de elasticidad, de tal manera que si se conoce su frecuencia de resonancia se puede determinar su módulo de Young.

En esta tesis la técnica será aplicada en estructuras tipo trampolines, diseñados y fabricados mediante el proceso de fabricación de micro maquinado superficial y de volumen PolyMEMS-INAOE. Las vibraciones de estas estructuras pueden estudiarse con el modelo de Euler-Bernouilli [26] en el cual se establece que las frecuencias normales de vibración de una barra dependen de sus dimensiones geométricas, su densidad y módulo de Young. La frecuencia de resonancia  $f_0$  de un trampolín se calcula a través de la ecuación 1.2; que relaciona la densidad del material  $\rho$ , el módulo de Young *E* del material, longitud del trampolín *l* y el espesor *t* de la estructura [26].

$$f_0 = \frac{\lambda^2 t}{4\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$
(1.2)

Donde  $\lambda = 1,875$  es el eigen valor correspondiente al primer modo de resonancia. La densidad  $\rho=2.33g/\text{cm}^3$  es correspondiente a la densidad del Poly-si [8, 12, 13, 27]. La ecuación 1.2 muestra que la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud del trampolín ( $l^2$ ). Es decir, existe una relación lineal igual a  $f_0 = ml^2$ , en donde el término m agrupa todos los términos restantes de la ecuación 1.2, de manera que  $m = \frac{\lambda^2 t}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$ . El objetivo es realizar mediciones en trampolines de longitudes diferentes y de espesores diferentes. Los espesores de las películas serán de 1, 2 y 3µm. Después de realizadas las mediciones los datos serán agrupados por espesores. Si se grafican las frecuencias de resonancia para cada valor de  $l^2$  se obtendrá una línea recta con una pendiente, de esta manera el módulo de Young se puede calcular como:

$$E = 48\rho \left(\frac{\pi}{\lambda^2 t}m\right)^2 \tag{1.3}$$

Por lo tanto, después de agrupar los datos por espesores se procederá a ordenarlos en una gráfica de  $f_0$  vs  $t^2$  con el objetivo de obtener la pendiente de dicha gráfica mediante un ajuste lineal; posteriormente calcular el valor de *E*.

Hasta el momento no se han considerado los mecanismos de disipación de energía (efectos de amortiguamiento) que se presentan en las estructuras de prueba, que pueden afectar en la

medición del MY. Los tres mecanismos de disipación de energía más importantes son: amortiguamiento por radiación en el anclaje, amortiguamiento del aire y amortiguamiento por disipación termoelástica.

El *amortiguamiento por radiación en el anclaje* se origina por la disipación de energía del trampolín a través del anclaje mecánico, causado por deformaciones locales y/o deslizamientos. Un parámetro de medida que ayuda a cuantificar el amortiguamiento es el factor de calidad *Q*. El factor de calidad es un parámetro que mide la relación entre la máxima energía de vibración almacenada y la energía total disipada por ciclo de oscilación [28]. Una estructura con un factor de calidad alto, implica que almacena más energía mecánica para vibrar, que la que disipa. El factor de calidad por amortiguamiento en el anclaje en un trampolín resonante en el primer modo de vibración, se aproxima de la siguiente forma.

$$Q_{anclaje} \cong 2.17 \left(\frac{l}{t}\right)^3 \tag{1.4}$$

Donde *l* es la longitud del trampolín, *t* es el espesor del mismo. Si la relación de  $l/t \ge 50$ , entonces el valor del factor de calidad será mayor a  $2.7 \times 10^5$ ; como es el caso de las estructuras que se utilizan en este trabajo. Un factor de calidad  $Q_{anclaje}$  de magnitud alta, implica que las pérdidas por radiación en el anclaje no son un factor dominante; el amortiguamiento por este mecanismo se hace importante para estructuras cuya razón de l/t < 10 [28].

El *amortiguamiento por el aire* se presenta a través de la transferencia de energía mecánica de la estructura vibrante, hacia el gas circundante. Las pérdidas por este mecanismo, se puede dividir en dos regiones: intrínseca y molecular-viscosa. En la región *intrínseca* la presión del aire es tan baja que el amortiguamiento debido a la fricción del aire no es un factor significativo de pérdidas de energía [28]. En la región *molecular-viscosa* el amortiguamiento es causado por colisiones independientes de las moléculas del aire con la superficie del trampolín; es decir, se manifiesta como un colchón de aire que se comprime y descomprime, debido a las oscilaciones de la estructura. El colchón de aire se encuentra justo por debajo de la estructura, en la separación ubicada entre la superficie del sustrato y la cara inferior del trampolín. El amortiguamiento en esta región es relevante si la separación entre la estructura y el sustrato es igual o menor a <sup>3</sup>/<sub>4</sub> del espesor del trampolín [28]. Por lo tanto para una estructura con una separación mayor a este criterio, la disipación de energía por este mecanismo puede ser despreciable.

Por último, el *amortiguamiento por disipación termoelástica* se presenta cuando el trampolín experimenta perdidas de energía por calentamiento/enfriamiento de su estructura mientras vibra. Cuando un trampolín vibra una región de la estructura experimenta un esfuerzo de compresión, mientras que la región opuesta experimenta un esfuerzo de tensión. Un esfuerzo de compresión aumenta la temperatura de la región estructural que la experimenta; mientras que en una región que se tensa la temperatura disminuye. Por lo tanto, en el trampolín se tiene una región caliente y otra fría mientras vibra. La pérdida de energía se debe al flujo de calor que va de la región caliente hacia la región fría. Este mecanismo de disipación de energía es importante en un trampolín con un área de sección transversal de gran dimensión. Sin embargo, para un trampolín de dimensiones micrométricas el amortiguamiento por disipación termoelástica es despreciable [28].

Después de comparar los tres mecanismos de amortiguamiento, es pertinente mencionar que el amortiguamiento por aire, puede representar el mayor mecanismo de disipación de energía. La influencia del amortiguamiento por aire en el trampolín puede causar un cambio de frecuencia de resonancia en un 6% y su factor Q puede variar en 2% [29].

### 1.3.1.2. Esquema de medición.

El esquema simplificado propuesto para la medición de frecuencias de resonancia de los trampolines se muestra en la figura 1.2. Consiste en colocar una muestra o dado de silicio que contenga los trampolines, sobre una fuente de excitación mecánica (piezoeléctrico o PZT). Mediante un generador de funciones y un amplificador de señales se alimenta eléctricamente el PZT haciéndolo vibrar. Es importante mencionar que la señal de excitación debe ser Senoidal (vibración natural de primer armónico), porque es una de las condiciones de frontera de la ecuación 1.2.

El esquema se completa con un sistema óptico formado por un microscopio, sensores y un láser de Ne-He. La idea principal es dirigir el haz del láser, hacia el trampolín vibrante, este a su vez refleja la luz hacia el sensor óptico. El sensor óptico convertirá la intensidad del láser incidente en una intensidad de corriente continua proporcional. Un barrido de frecuencias debe realizarse para encontrar la frecuencia de resonancia de la estructura. Se espera que la magnitud de la intensidad del láser reflejado por el trampolín permanezca estable siempre que no entre en resonancia; lo que se registrará como una corriente estable en el sensor. Y que cuando el trampolín entre en resonancia la magnitud de las vibraciones provocará que la luz reflejada se disperse, lo que provocará que en el sensor se registre una disminución en la intensidad de la luz, por consiguiente una disminución en la corriente. La variación en la intensidad de la corriente se registrará en un bloque electrónico controlado por una computadora, que procesará toda la información relacionada con la vibración del trampolín. Una revisión más exhaustiva del esquema de medición se presenta en el capítulo 4.



Figura 1.2. Esquema propuesto para la medición del módulo de Young.

### **1.3.2.** Esfuerzos residuales.

Un material puede experimentar un esfuerzo mecánico,  $\sigma$ , si se le aplica una fuerza externa. En este caso, después de que se elimina la fuerza, se espera que el esfuerzo desaparezca. En el caso de una película de Polisilicio (Poly-si), siempre que se deposita sobre una película de otro material, sufre un esfuerzo mecánico incluso sin la influencia de fuerzas externas aplicadas y son caracterizadas por un esfuerzo interno o esfuerzo mecánico residual (EMR) [30]. Su origen se debe principalmente a las diferencias en las constantes de red (lattice mismatch) de la película de Poly-si y el material subyacente (generalmente Nitruro y Oxido de Silicio); la diferencia en el coefficiente de expansión térmica entre los materiales; defectos puntuales como impurezas intersticiales, substitucionales y vacancias; además de las condiciones de depósito y los ciclos térmicos a los que se encuentre expuesto el material durante su proceso de fabricación [30]. En general los esfuerzos residuales se pueden clasificar en extrínsecos.

Los esfuerzos extrínsecos se deben principalmente a la discordancia del coeficiente de expansión térmica del Poly-si y de los materiales subyacentes. Los esfuerzos residuales extrínsecos se clasifican en dos tipos: estiramiento y compresión. Ambos causan deformaciones mecánicas (Strain), comúnmente denotados con la letra griega  $\varepsilon$ . De esta forma una película de Poly-si que haya estado sometida a un esfuerzo residual extrínseco, después de ser liberada, exhibirá una deformación de contracción o de expansión como consecuencia de la relajación del material. Por ello una película de Poly-si que haya estado sometida a un esfuerzo de tensión, al ser liberada experimentará una relajación mecánica que se manifiesta como una contracción volumétrica del material; así mismo, si la película estuvo sometida a un esfuerzo de compresión, al ser liberada experimentará una expansión volumétrica. Los esfuerzos mecánicos se pueden cuantificar mediante la expresión 1.5.

$$\sigma = \pm \varepsilon E \tag{1.5}$$

Por convención la expresión 1.5, adoptará un valor positivo si se analiza un esfuerzo de estiramiento; mientras que si se estudia un esfuerzo de compresión la expresión adoptará un signo negativo. En ambos casos se considera que los esfuerzos son uniformes a través del espesor del material.

Por otro lado, cuando las deformaciones mecánicas originan curvaturas cóncavas ó convexas a lo largo de la película de Poly, se dice que el material está afectado por un *gradiente de esfuerzo mecánico (GEM)*,  $\Delta \varepsilon/t$ . Los GEM se consideran esfuerzos intrínsecos, y son provocados principalmente por diferencias en la constante de red del Poly-si (estructura del grano); también depende en gran medida de las condiciones de depósito de la película como la temperatura, presión y razón de depósito. Los GEM se distribuyen a través del espesor de la película. Los gradientes positivos,  $+\Delta \varepsilon/t$ , generan una curvatura convexa sobre la película de Poly-si; mientras que los gradientes negativos,  $-\Delta \varepsilon/t$ , producen una curvatura cóncava [30].

Para el Poly-si, se ha reportado que los depósitos por LPCVD, la oxidación de la película (crecido o depositado) y el depósito de PSG, inducen esfuerzos de compresión. Así mismo, las películas de Poly-si generalmente exhiben gradientes de esfuerzo positivos; al presentar mayores esfuerzos de compresión en la interfaz Poly-Si y SiO<sub>2</sub>/PSG [4, 7, 30]. Los esfuerzos residuales de compresión y gradientes de esfuerzo presentes en el Poly-si, pueden disminuirse con tratamientos térmicos pos dopado por encima de los 1000°C [30, 31]. También es posible disminuir los esfuerzos residuales si el Poly-si es depositado a una temperatura de 580°C (temperatura de transición de amorfo a policristalino) y se recristaliza a temperaturas por encima de 600°C; con esto se logra una restructuración de silicio amorfo a Poly-si, lo que provoca una contracción en la película depositada, y transforma el esfuerzo de compresión a un esfuerzo de tensión [7, 30, 31]. En la industria de los MEMS se busca que la película de Poly-si exhiba un esfuerzo de tensión bajo (menor a +10MPa) en lugar de un esfuerzo de compresión [7]. Sin embargo un esfuerzo de compresión menor a -15MPa se considera una película estructural mecánicamente estable [5, 6, 7, 30, 31, 32, 33].

## 1.3.3. Conductividad Térmica y calor específico.

En el Poly-si la conductividad térmica (CT) y el calor específico (CE) son propiedades importantes, porque de estas propiedades depende el diseño de micro actuadores o sensores con aplicaciones que involucren principios térmicos. Por ejemplo, si se conoce la CT y el CE del material con el que se construye una estructura termo-mecánica oscilante, se puede predecir su respuesta en frecuencia, como es el caso de los actuadores tipo Chevron (TBA) [34].

El *calor específico*, define la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa de un sistema termodinámico, para elevar su temperatura en una unidad. Su definición formal se expresa en la ecuación 1.6. Donde q es el calor transferido (J/s),  $C_p$  es el calor específico (J/kg K),  $\rho$  es la densidad el material (kg/m<sup>3</sup>), A es el área de sección transversal (m<sup>2</sup>) y t es el tiempo (seg).

$$q = C_p \rho A \frac{\partial T}{\partial t} dx \tag{1.6}$$

El calor específico del Poly-si puede ser tan similar al CE del silicio cristalino, el cual ha sido experimentalmente estudiado a temperatura ambiente [35]. Se ha reportado que el valor de CE para el Poly-si, puede variar en un 5% respecto del silicio cristalino [35]. Un valor típico reportado para el CE en silicio cristalino es de 705J/kg K, que puede usarse como una buena aproximación a temperatura ambiente.

El calor específico está intimamente relacionado con la conductividad térmica. Ya que la conductividad térmica caracteriza la velocidad con la que el calor se transfiere a través del material. Y por lo tanto define intrínsecamente el valor del calor específico.

La conductividad térmica  $\kappa$ , es un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante la comunicación molecular directa cuando existe un gradiente de temperatura. Una definición formal de la CT se expresa en la ecuación 1.7.

$$q = -k\frac{\partial T}{\partial x} \tag{1.7}$$

Donde q es el flujo de calor por unidad de área (W/m<sup>2</sup>),  $\kappa$  es la conductividad térmica (W/mK), T es la temperatura del material (K), x es la dirección de propagación de la energía (m). En materiales sólidos el calor es transportado por dos mecanismos de conducción: por

vibraciones en la red (fonones) y por los electrones libres. Sin embargo dependiendo del tipo de material (conductor, aislante o semiconductor) y de su configuración estructural (cristalina, policristalina o amorfa); la contribución de un mecanismo puede ser más significativa con respecto al otro. En materiales semiconductores como el Poly-si el mecanismo de conducción por fonones es el de mayor contribución, mientras que la conducción por electrones es ínfima. La conducción por fonones está determinado por el recorrido libre medio (mean free path) [36, 37]; y éste depende de los procesos de dispersión (scattering) en la red. Los procesos de dispersión en el Poly-si son: dispersión por frontera (boundary scattering), por imperfecciones en la red (imperfection scattering), por impurezas (impurity scattering) [36]. El último proceso de dispersión se lleva a cabo en las inmediaciones de los micro-cristales; mientras que los cuatro procesos restantes se desarrollan a dentro de estos. En la figura 1.3 se muestra una representación de estos procesos.



Figura 1.3 Representación de los procesos de dispersión de fonones en un material policristalino [34].

En el Poly-si el proceso de dispersión por frontera de grano es el que más influye en la CT [36, 37, 38]. Debido a que la frontera de grano representa una discontinuidad en la periodicidad de la red, lo que disminuye drásticamente el recorrido medio libre de los fonones. Algunos autores suponen que la frontera de grano es infinitesimalmente delgada y que por lo tanto se puede modelar como si se tratara de una dispersión por frontera [39]. Sin embargo en la realidad la frontera de grano es de un espesor finito, la cual puede actuar como un sitio en donde se llevan a cabo más de un proceso de dispersión [39]. Por ello cuando se modela la conductividad térmica es importante tomar en cuenta las condiciones de frontera que describen la estructura del Poly-si.



Figura 1.4. Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura, para películas de Poly-si y silicio cristalino [38].

Consecuentemente, la conductividad térmica del Poly-si es fuertemente dependiente de la temperatura. En la figura 1.4 se observa esta dependencia para películas de Poly-si y silicio cristalino. Cabe hacer notar que en ambos materiales el comportamiento es similar, teniendo un pico máximo en temperaturas bajas (~150K para Poly-si y 70K para el silicio monocristalino). Así mismo, se puede notar que en el Poly-si la CT es un orden de magnitud menor que en el silicio monocristalino. Esto se debe principalmente a que en el silicio monocristalino no existe dispersión por frontera de grano. También se ha reportado que el tipo de dopado en el Poly-si influye en la magnitud de la CT; las películas tipo p (dopadas con boro) exhiben un orden de magnitud menor a las películas tipo n (dopadas con fosforo) [38]. Así mismo, películas de Poly-si con un arreglo estructural de tipo columnar, presentan un orden de magnitud mayor que las películas con arreglo estructural aleatorio [38]. Incluso a temperatura ambiente los valores de conductividad térmica pueden variar entre 17 a 70W/mK [38, 40]; debido al nivel de dopado, condiciones de depósito y tratamientos térmicos.

### 1.3.3.1 Técnica de medición mediante el método 3ω.

Para medir las propiedades térmicas, se utilizará el método de  $3\omega$ . Es una técnica no destructiva ampliamente utilizada para la medición de la conductividad térmica. Es adecuada para películas delgadas y sustratos. Sin embargo, se ha extendido para medir la CT de películas dieléctricas, estructuras de súper redes periódicas y estructuras no periódicas multicapas [40]. Se puede utilizar para medir en un amplio rango de temperaturas desde 30K hasta 750K [40].

Esta técnica resulta insensible a las pérdidas por convección o radiación, si la geometría de la estructura de prueba se diseña adecuadamente. Además, la apropiada elección del rango de frecuencias  $\omega$ , puede eliminar condiciones de frontera problemáticas que se pueden presentar entre la muestra y el montaje externo del experimento [40].



Figura 1.5. Representación del principio de operación del método 3ω.

La principal ventaja de este método, es que la misma estructura de prueba se puede utilizar como calefactor y como sensor de temperatura; si ésta es eléctricamente conductora y con una resistencia eléctrica dependiente de la temperatura [41].

Una corriente eléctrica alterna (CA) de la forma  $I_0Sen(\omega t)$  inyectada a la estructura de prueba, crea una fluctuación de temperatura a una frecuencia de 2 $\omega$ ; por consiguiente la resistencia interna (dependiente de la temperatura) oscila a lo largo de la estructura a una

frecuencia 2 $\omega$ . Las fluctuaciones de resistencia conducen a una fluctuación del voltaje en 3 $\omega$  (V<sub>3 $\omega$ </sub>) a través de la muestra [40]. La representación de este principio se muestra en la figura 1.5.

La magnitud del voltaje  $3\omega$  (valor RMS) puede relacionarse con la conductividad térmica a través de la expresión matemática desarrollada en [41]; la cual se muestra en la ecuación 1.7.

$$V_{3\sigma}(t) \approx \frac{4I^{3}LRR'}{\pi^{4}kS\sqrt{1+(2\omega\gamma)^{2}}}$$
(1.7)  

$$\gamma \equiv \frac{L^{2}}{\pi^{2}\alpha} \quad ; \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_{p}}$$
  

$$C_{p} = \frac{\pi^{2}\gamma k}{\rho L^{2}}$$
(1.8)

Donde *L* es la longitud del puente, R es la resistencia inicial (a temperatura ambiente) de la estructura, R' es la fluctuación de la resistencia debido a la variación de la temperatura en  $2\omega$ ,  $\rho$  es la densidad de la muestra,  $\gamma$  es la constante de tiempo térmica, *S* es el área de la sección transversal de la muestra,  $\alpha$  es la difusividad térmica, y *C*<sub>p</sub> es calor especifico, cuya relación con la CT se muestra en la ecuación 1.8.



Figura 1.6. Esquema de medición del voltaje 3ω.

Para realizar las mediciones del voltaje  $3\omega$  se utiliza el esquema presentado en la Figura 1.6. Una corriente de CA con frecuencia  $\omega$  se inyecta en los extremos de la estructura, y se mide el valor RMS del voltaje  $V_{3\omega}$ , en las terminales internas. La temperatura del sustrato permanece estable; los extremos del puente funcionan como sumideros de calor; el calor que se genera en el puente por el flujo de corriente, fluye hacia estos sumideros. La prueba se realiza en vacío para evitar pérdidas por convección. El diseño del puente toma en cuenta las condiciones de frontera (resaltados en el esquema en color rojo). Es decir, que los extremos del puente se consideran a temperatura del sustrato.

La figura 1.7 muestra el esquema de instrumentación que se utilizará para realizar las mediciones. Las muestras serán colocadas dentro de un crióstato con capacidad para enfriar o calentar la muestra en condiciones de vacío. La corriente de prueba será suministrada por una fuente de corriente CA, (circuito de transconductancia construido con Amplificadores Operacionales).



Figura 1.7. Esquema de la instrumentación para medición del voltaje 3ω.

Utilizando un amplificador lock-in se medirá la magnitud del voltaje  $V_{3\omega}$ . Posteriormente, relacionando el voltaje medido con la ecuación 1.7 se obtiene la conductividad térmica  $\kappa$  y la constante de tiempo térmica  $\gamma$ , mediante técnicas de ajuste. Posterior a este cálculo se deduce el calor específico mediante la ecuación 1.8.

En el diseño del chip PolyMEMS VII se contempla las estructuras de prueba para aplicar esta técnica. En el capítulo 2 se exploran las condiciones y criterios empleados para el diseño de las estructuras.

## Referencias del capítulo.

- [1] Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, LIMEMS, 2010, http://www-elec.inaoep.mx/lnn/index.php.
- [2] SUMMiT V<sup>™</sup> Five Level Surface Micromachining Technology Design Manual SANDIA Number: 008-0659P; Version 3.1, 2005, Sandia Laboratories; http://www.mems.sandia.gov/tech-info/summit-v.html.
- [3] The Multi-User MEMS Processes or PolyMUMPS, 2010, MEMS Company, http://www.memscap.com/en mumps.html
- [4] Alanís Andrés, *Desarrollo del Proceso de Fabricación PolyMEMS INAOE*, INAOE, Tesis de Maestría, 2008.
- [5] Quiñones Fernando, *Fabricación de microestructuras Joule con polysilicio*, Octubre 2009, INAOE, Tesis de Maestría.
- [6] Diaz, D., *Estudio de los Mecanismos de Colapso en Microactuadores y su influencia en Microsistemas*, 2008, INAOE, Tesis de Licenciatura.
- [7] P.J. French, *Polysilicon: a versatile material for microsystems*, Sensors and Actuators A, 99, (2002), 3–12.
- [8] Matthew A. Hopcroft, William D. Nix, and Thomas W. Kenny, *What is the Young's Modulus of silicon?*, Journal Of Microelectromechanical Systems, Vol. 19, NO. 2, 2010, 229.
- [9] Chisheng Yu, Changchun Hsu, Weileun Fang, Comments on determining the elastic modulus of a thin film using the micromachined free-free beam, Journal Of Micromechanics And Microengineering, 2005, 351–357.
- [10] Weileun Fang, Determination of the elastic modulus of thin film materials using selfdeformed micromachined cantilevers, Journal Of Micromechanics Microengineering, 9, (1999) 230–235.
- [11]L. Kiesewetter, M. Zhang, D. Houdeau, A. Steckenborn, *Determination of Young's module of micromechanical thin films using the resonance method*, Sensors and Actuators A, 35, 1992, 153-159.
- [12] Raj K. Gupta, Electrostatic Pull-In Test Structure Design For In-Situ Mechanical Property Measurements Of Microelectromechanical Systems (MEMS), PhD Tesis, The Massachusetts Institute of Technology, June 1997.
- [13] E.H. Yang, H. Fujita, Determination of the modification of Young's modulus due to Joule heating of polysilicon rnicrostructures using U-shaped beams, Sensors and Actuators A, 70, 1998, 185-190.
- [14] Peter M. Osterberg, Stephen D. Senturia, M-TEST: A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures, Journal Of Microelectromechanical Systems IEEE, Vol. 6, No. 2, June 1997, 107-118.
- [15] J.M. Meza, E. E. Franco, M. Farias, F. Buiochi, R. M. Souza, J. Cruz, Medición del módulo de elasticidad en materiales de ingeniería utilizando la técnica de indentación instrumentada y de ultrasonido, Revista De Metalurgia, 44, Enero-Febrero, 2008, 52-65.

- [16] N. Cuadrado, D. Casellas, J. Caro, L. Llanes, *Caracterización Mecánica Mediante La Técnica De Nanoindentación De Partículas Duras*, Anales de Mecánica de la Fractura 26, Vol. 2, 2009. 566-571.
- [17] William N. Sharpe, Jr., Bin Yuan, and Ranji Vaidyanathan, Measurements Of Young's Modulus, Poisson's Ratio, And Tensile Strength Of Polysilicon, Proceedings of the Tenth IEEE International Workshop on Microelectromechanical Systems, Nagoya, Japan, 1997, 424-429.
- [18] Kuo-Shen Chen, *Techniques in Residual Stress Measurement for MEMS and Their Applications*, Department of Mechanical Engineering, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, 70101, R.O.C.
- [19] Chih-Chan Lu, Ying-Chou Cheng, Chi-Yuan Lee, *A new test structure to determine the Poisson's ratio of thin films using resonant method*, ICEE-CON, 2004.
- [20] Yong Zhu, Francois Barthelat, Paul E. Labossiere, Nicolaie Moldovan, Horacio D. Espinosa, *Nanoscale Displacement and Strain Measurement*, Proceedings of the 2003 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, June 2-4, Charlotte, North Carolina, Session 77, Paper 155, 2003.
- [21] PEREZ RUIZ, S.J et al. *Optical sensing technique for Young's modulus measurements in piezoelectric materials*, Revista mexican de Fisica. [online]. 2008, vol.54, n.3, pp. 253-256. ISSN 0035-001X
- [22] Duanqin Zhang, Jinkui Chu, *Mechanical characterization of post-buckled micro-bridge beams by micro-tensile testing*, Microsystem Technology, Springer", 16, 2010, 375–380.
- [23] M. Zeeshan Siddiqui, Fawad Tariq, Nausheen Naz, M. Fahad Ahmed, Determination of Young's Modulus of Metallic and Composite Materials by Digital Image Correlation, Journal of Space Technology, Vol 1, No. 1, July 2012, 32-37.
- [24] Wouters, R. Puers, *Determining the Young's modulus and creep effects in three different photo definable epoxies for MEMS applications*, Sens. Actuators A: Phys. 2009, doi:10.1016/j.sna.2009.03.021.
- [25] C.-S. Oh, W.N. Sharpe Jr; *Techniques for measuring thermal expansion and creep of polysilicon*, Sensors and Actuators A, 112, 2004, 66–73.
- [26] Singiresu S. Rao, Vibraciones Mecánicas, 5ta Ed, PEARSON, 2012, ISBN:987-607-32-0952-6.
- [27] Villarroya G. María, Diseño y fabricación de sistemas micro/nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores bilógicos con palancas como elementos transductores, PhD Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona, 2005, 34.
- [28] Narducci M. Margarita, *Modelado y desrrollo de microcantievers resonantes para sensores*, PhD Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona, 2010.
- [29] A. Ricci, E. Giuri, FSI Analysis of microcantilevers vibrating in fluid enviroment, Proceedings of the COMSOL Conference, Milan, 2009.
- [30] Laconte, J., Flandre, D., Raski, D., *Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration*, Springer, 2006, Pág 48-50.
- [31] Jan G. Korvink, Oliver Paul, *MEMS: a practical guide to design, analisis, and applications*, Springer, 2006, Cap 2, Pág. 75-79
- [32] F. Quiñones, D. Diaz, A.et al, *Estudio de Esfuerzos Mecánicos Residuales sobre monitores integrados en el chip PolyMEMS V-INAOE*, IBERCHIP, Bogotá, Colombia, Febrero 2011, pag 1-4.

- [33] F. Quiñones Novelo, *Desarrollo y caracterización de microestructuras Joule con polysilicio*, Tonanzintla Puebla, México, 2009, pp. 10-15,17-40,72-74.
- [34] Yan, Dong, *Mechanicals desing and modeling of MEMS thermal actuators for RF applications*. University of Waterloo, Ontario, 2002. pp. 22-30.
- [35] Brand, Fdder, Hierold, et al, System-level Modeling of MEMS, Vol. 10, WILEY-VCH, 2013, pp 130.
- [36] M. Asheghi, K. Kurabayashi, et al, *Thermal conduction in doped single-crystal silicon films*, Journal of Applied Physics, Volume 91, Number 8, 2002.
- [37] Timothy S. English, Justin L. Smoyer, John C. Duda, *Modeling Grain Boundary Scattering And Thermal Conductivity Of Polysilicon Using An Effective Medium Approach*, Proceedings of the ASME/JSME, 8<sup>th</sup>, 2011, AJTEC2011.
- [38] S. Uma, A. D. McConnell, et al, *Temperature-Dependent Thermal Conductivity of Undoped Polycrystalline Silicon Layers*, International Journal of Thermophysics, Vol. 22, No. 2, 2001.
- [39] Goodson, K. E., *Thermal conduction in nonhomogeneous cvd diamond layers in electronic microstructures.* Journal of Heat Transfer, 118(2), 1996, pp. 279–286.
- [40] Patrick E. Hopkins, Leslie M. Phinney2, Thermal Conductivity Measurements on Polycrystalline Silicon Microbridges Using the 3ω Technique, Journal of Heat Transfer, APRIL 2009, Vol. 131, DOI: 10.1115/1.3072907
- [41] Lu, L. and Yi, W. and Zhang, D. L. 3ω method for specific heat and thermal conductivity measurements. Review of Scientific Instruments, 72, 2001, 2996-3003.

# Capítulo 2. Diseño del Chip PolyMEMS VII.

## 2.1 Introducción.

En éste capítulo, se presentan el diseño del chip PolyMEMS VII; el cual fue dividido en 3 secciones principales. Cada sección o grupo contiene estructuras especializadas, diseñadas para medir propiedades mecánicas y térmicas. En este capítulo se presentan los criterios y consideraciones para el diseño de cada grupo de estructuras. Primeramente se revisa las estructuras diseñadas para medir los esfuerzos mecánicos residuales y el módulo de Young. Posteriormente se presentan el diseño de las estructuras puente, orientadas a medir la conductividad térmica y el calor específico.

## 2.2. El monitor de esfuerzo mecánico de compresión.

Al diseñar y fabricar nuevos dispositivos es importante controlar y cuantificar las características estructurales del material; con el fin de obtener estructuras de alta calidad y alto desempeño. Para ello, se emplean y diseñan los Monitores de Esfuerzos Mecánicos (MMS por sus siglas en ingles), que son capaces de cuantificar cualitativa y cuantitativamente el esfuerzo mecánico residual (EMR) del material.

Un monitor MMS se clasifica de acuerdo al EMR que es capaz de medir. Es decir se clasifican en los MMS de tensión, compresión y gradiente de esfuerzo. La tabla 2.1 muestra los MMS utilizados en la tecnología PolyMEMS-INAOE para analizar los esfuerzos residuales en las películas de Poly-si.

Con la experiencia previa obtenida en los trabajos [1, 2, 3], se consideraron las ventajas y desventajas de cada estructura; y se decidió solo incluir los MMS esenciales para estudiar los EMR, con la finalidad de optimizar el diseño del chip PolyMEMS-VII. También se consideraron los módulos y condiciones de fabricación utilizados en el proceso PolyMEMS-INAOE.

Estructura	Principio de Operación	Esfuerzo residual
Puentes	Transición de	Compresión
Anillo-Viga	"Puokling"	Estiramiento.
Diamantes	Bucking	
Vernier	Desplazamiento de	Compresión y
Indicador de deformación	alguna parte estructural	estiramiento
Trampolines	Deflexión de la punta	Gradientes de
Espirales	Contracción lateral, rotación y altura del extremo suspendido	esfuerzos residuales.

Tabla 2.	1 Clasificación	de los MMS	utilizados en l	a tecnología	PolyMEMS INA	<b>NOE</b> [1].

Como se mencionó en el capítulo 1, debido a los depósitos por LPCVD, a las oxidaciones de las películas y los depósitos de PSG durante el proceso de fabricación, se espera que la película de Poly-si experimente EMR de *compresión (EMRC)* [4, 5]. Por lo tanto se decidió que la estructura tipo puente se incluiría en el diseño del chip por ser la estructura más simple y adecuada para la medición de un EMRC.

Una estructura tipo puente está formada por una viga suspendida y anclada en sus dos extremos. Cuando se encuentra sometido a un esfuerzo de compresión presenta una deformación mecánica llamada "buckling", como se observa en la figura 2.1.



Figura 2.1. Representación de una estructura puente experimentando un buckling [laconte].

Para estudiar el EMRC se utiliza un arreglo de puentes, variando sus longitudes, anchos y espesores. Para estimar el esfuerzo de compresión en el Poly-si se identifica la estructura puente de menor longitud que presenta buckling. La longitud de dicha estructura es identificada como longitud crítica  $L_{cr}$ . Utilizando la ecuación 2.1 es posible relacionar dicha longitud con la deformación  $\varepsilon$  que sufre la estructura [6].

$$\varepsilon_{cr} = -\frac{\pi^2}{12L_{cr}^2} \left( 3A^2 + 4t^2 \right)$$
(2.1)

Donde t es el espesor del Poly-si, A es la amplitud del buckling. Como se observa la ecuación estudia una deformación a lo largo del eje longitudinal (eje x), es decir una deformación uniaxial. Lo que significa que el ancho w del puente, debe ser mucho menor que su longitud. Por ello la expresión 2.1 no es dependiente de esta dimensión. Sin embargo es recomendable que el acho del puente sea más grande que su espesor; para asegurar una buena estabilidad mecánica y evitar una deformación en otra dirección diferente al eje x.

Posteriormente, al obtener la deformación del puente de longitud crítica, se calcula el esfuerzo de compresión utilizando la ecuación 2.2.

$$\sigma = -\mathcal{E}E \tag{2.2}$$

Como se mencionó en el capítulo 1 se espera que después de una fabricación exitosa, el Poly-si experimente un esfuerzo de compresión menor a -15MPa [5]. En este trabajo se estudian los espesores de 1, 2, y 3  $\mu$ m de Poly-si, que corresponden a los espesores que se utilizan en el proceso PolyMEMS-INAOE.

Para asegurar un diseño que permita identificar con certidumbre la magnitud del EMRC, se utilizaron las ecuaciones 2.1 y 2.2; para identificar las longitudes críticas y los valores de esfuerzo mínimo que pueden experimentar los puentes. Para ello se proyectó una serie de gráficas, mostradas en las figuras 2.2, 2.3 y 2.4.


Figura 2.2 Gráfica de EMRC para puentes de 1µm de espesor.



Figura 2.3. Gráfica de EMRC para puentes de 2µm de espesor.



Figura 2.4 Gráfica de EMRC para puentes de 3µm de espesor.

El esfuerzo calculado en cada una de las gráficas está en función de las longitudes de los puentes y de los tres espesores en estudio; además se tomó en cuenta el rango de valores de módulo de Young reportado, que va desde 130 a 190GPa [7, 8, 9, 10]. Las gráficas muestran que conforme se disminuye el espesor del Poly, las estructuras se hacen más sensibles y pueden identificar EMRC de magnitudes más pequeñas. Se obtiene el mismo resultado, si en lugar de disminuir el espesor del Poly, se aumenta su longitud. Por lo tanto, en el diseño del chip PolyMEMS-VII, se incluyen puentes de longitudes que van desde 150µm hasta 1000µm. Los puentes mayores a 400µm están puestos en el arreglo para identificar los EMRC en caso de que estén por debajo de los -10MPa. Las dimensiones y la identificación de los puentes incorporados en el chip se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Identificación y dimensiones de los Puentes incluidos en el chip PolyMEMS VII.Se Dos columnas de puentes de 15 y 10µm de ancho.

Numeración de Estructuras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Longitud L [µm]	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Numeración de Estructuras	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Fernand			-	Diseñ	o del o	chip F	Ca PolyME	pítulo 2. MS VII.			
	Longitud L [µm]	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	

En la figura 2.5 se muestra el diseño (layout) del arreglo de puentes incluido en el chip. Cabe mencionar que en el diseño se incorporan dos series de arreglos de puentes con anchos de 10 y 5µm. La serie de puentes de 5µm ancho se incluyeron con el fin de comprobar si es posible obtener estructuras suspendidas de estas características con el proceso de fabricación PolyMEMS-INAOE. Los puentes están rodeados por marcos rectangulares, que a su vez sirven de soportes o anclas; así mismo los puentes se inclinaron 45° con el propósito de evitar orientaciones cristalinas de (111) en el sustrato, durante un micro maquinado de volumen húmedo.



Figura 2.5 Patrón geométrico de las estructuras tipo Puente.

#### 2.3. El Monitor de gradientes de esfuerzo residual y frecuencia de resonancia.

La importancia de caracterizar el gradiente de esfuerzo mecánico (GEM), es porque existen estructuras de diseño particular, que pueden experimentar este tipo EMR; como por ejemplo los Actuadores Térmicos Bimórficos (Thermal Bimorph Actuators o TBA) [11, 12].

Una película de Poly-si puede presentar mayores esfuerzos de compresión en la interfaz Poly-Si y SiO<sub>2</sub>/PSG mientras se deposita por LPCVD [4, 5]. Debido a este hecho generalmente las películas exhiben gradientes de esfuerzo mecánicos (GEM) positivos. Para cuantificar los GEM se utilizan las estructuras trampolín y espiral, como se menciona en la tabla 2.1; y por la simplicidad de su diseño el trampolín es el MMS más utilizados para este fin.

Los trampolines son vigas suspendidas ancladas únicamente en uno de sus extremos, se utilizan como herramientas para determinar un GEM a través del grosor de una película. Los gradientes de esfuerzos positivos ocasionan que la punta del trampolín se flexione hacia arriba, como se muestra en la figura 2.6; mientras que gradientes de esfuerzos negativos provocan que la punta del trampolín se flexione hacia abajo.



Figura 2.6. Diagrama de un Trampolín bajo un gradiente de esfuerzo mecánico positivo [5].

Para estimar el GEM en el Poly-si se identifica la estructura trampolín de menor longitud que presente flexión. Mediante la expresión 2.3 se puede calcular el GEM por unidad de grosor [5].

$$\frac{\Delta\sigma}{t} = E \frac{2h}{L} \tag{2.3}$$

Donde t es el espesor del Poly, L es la longitud del trampolín, h es la deflexión de trampolín y E es el módulo de Young.

Utilizando la ecuación 2.6, se proyectan las gráficas que se muestran en las figuras 2.7, 2.8 y 2.9. Estas gráficas presentan la magnitud del gradiente de esfuerzo que pueden experimentar los trampolines, en función de la longitud y del espesor de Poly-si estructural. Al igual que sucede con los puentes, las gráficas muestran que los trampolines también se vuelven más sensibles si se aumenta la longitud. Una vez más, se ha considerado sólo los tres espesores de las películas de Poly y del módulo de Young (MY). Los trampolines que se utilizan para caracterizar el GEM en el chip PolyMEMS VII, son los mismos que utilizaran para cuantificar el módulo de Young; por lo que sus dimensiones fueron diseñadas para responder a frecuencias de resonancias en el rango de kilo Hertz (kH); como se explica a continuación.



Figura 2.7. Gráficas del GEM para trampolines de 1µm de espesor.



Figura 2.8. Gráficas del GEM para trampolines de 2µm de espesor.



Figura 2.9. Gráficas del GEM para trampolines de 3µm de espesor.

Como se expuso en el capítulo 1, el trampolín es utilizado para la medición del módulo de Young; mediante la técnica de rastreo por frecuencias de resonancia (TRFR). Cabe recordar que la TRFR se aplica sobre un arreglo de trampolines de diferentes dimensiones. Los trampolines fueron diseñados tomando en cuenta el siguiente criterio. Los trampolines deben resonar a frecuencias en el rango de kHz, de esta forma las mediciones se facilitan, evitando el uso de equipos especiales de alta frecuencia. Se estudiaran tres espesores de películas de Poly-si, por lo que el diseño de trampolín debe seguir cumpliendo con el criterio anterior aun y cuando su espesor sea diferente. Para cumplir con el criterio, se trabajó en ajustar la longitud del trampolín, ya que como se vio en el capítulo 1, mediante la manipulación de la longitud de los trampolines, se puede fijar la frecuencia de resonancia (FR) de la estructura. Por comodidad para el lector en la ecuación 2.4, se reproduce la expresión presentada en el capítulo 1, que cuantifica la respuesta de resonancia.

$$f_0 = \frac{\lambda^2 t}{4\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$
(2.4)

Una serie de gráficas son construidas con la ecuación 2.4, y se presentan en la figuras 2.10, 2.11 y 2.12. En las gráficas, fueron consideradas longitudes de trampolines que van desde los 200 $\mu$ m hasta los 600  $\mu$ m, con un paso de 25 micras entre cada uno. También se tomó en cuenta los tres espesores en estudio y el rango reportado del MY. Y como se observa en las figuras el rango de FR para diferentes longitudes se cumple con el criterio de diseño. Es pertinente mencionar que la frecuencia de resonancia no depende del ancho del trampolín y por lo tanto esta dimensión se fija en 20 y 30 $\mu$ m. Estos anchos fueron pensados para que un esquema de medición óptico pueda medirlos con facilidad.



Figura 2.10. Gráfica de frecuencia de resonancia  $f_{\theta}$  contra la longitud de los de trampolines  $\frac{1}{l^2}$ , para un espesor de 1µm.



Figura 2.11. Gráfica de frecuencia de resonancia  $f_{\theta}$  contra la longitud de los de trampolines  $\frac{1}{l^2}$ , para un espesor de 1µm.



Figura 2.12. Gráfica de frecuencia de resonancia  $f_{\theta}$  contra la longitud de los de trampolines  $\frac{1}{l^2}$ , para un espesor de 1µm.

El diseño de los trampolines se presenta en la figura 2.13 y sus dimensiones en la tabla 2.3. El diseño del arreglo de trampolines contempla una fabricación superficial y de volumen. Los trampolines están anclados en el marco rectangular que los rodea; así mismo los puentes se inclinaron 45° con el propósito de evitar orientaciones cristalinas de (111) en el sustrato, durante un micro maquinado de volumen húmedo.

Longitud L (µm)	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600	650	425	375
Trampolines de w= 30μm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Trampolines de w= 20μm	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28

Tabla 2.3 Identificación y dimensiones de los trampolines incluidos en el Chip PolyMEMS VII.

Por último cabe mencionar que se realizaron simulaciones en el software de COVENTOR 2010, para cuantificar la flexión total que sufrirán los trampolines durante las pruebas de FR. El tipo de prueba realizado es análisis nodal, y se estudió el trampolín de mayor longitud (650µm), porque se espera que esta estructura exhiba la mayor flexión cuando resuene. El estudio fue realizado para el primer modo de vibración, que es la condición de frontera para

la cual la ecuación 2.4 es válida. Los resultados del análisis nodal mostraron que la estructura se flexiona hasta  $57\mu m$ , como se muestra en la figura 2.14. Esto se debe tomar en cuenta en la fabricación del chip para formar las cavidades con la profundidad suficiente para permitir la vibración. Para los trampolines restantes las flexiones son menores a  $50\mu m$ .



Figura 2.13. Diseño del arreglo de trampolines contenidos en el chip PolyMEMS VII.



Figura 2.14. Análisis modal para trampolín de 650um de longitud. La simulación fue realizado para el primer modo de vibración y *E*=160GP.

## 2.4. Estructuras para medir las propiedades térmicas.

En capítulo 1 se expuso la dependencia de la conductividad térmica (CT) con la temperatura; y de los procesos de dispersión presentes en el cristal [13, 14, 15]. También se abordó sobre la técnica  $3\omega$ , utilizada para llevar a cabo la medición de la CT. Así mismo, se mencionó que el puente es la estructura más adecuada para esta técnica, debido a que al mismo tiempo funciona como sensor de temperatura y como calefactor. Para aplicar esta técnica se diseñaron 3 estructuras puente de diferentes longitudes. Para que la prueba resulte valida se requiere que en los extremos de los puentes (terminales o pads) funcionen como sumideros de calor o disipadores. Para ello las terminales se diseñan lo suficientemente grandes como para asegurar un buen acoplamiento térmico hacia el sustrato. También se tomó en cuenta la capacidad del laboratorio para alambrar las estructuras. El tamaño de las terminales fue establecido en 400 x 300 $\mu$ m con una separación de 100 $\mu$ m. En total se utilizan cuatro terminales para anclar los puentes; las terminales de los extremos se utilizarán para suministrar la corriente alterna a la frecuencia  $\omega$ ; las terminales internas se utilizaran para medir el voltaje de  $3\omega$ . Como se expuso en el capítulo uno, la expresión que se muestra en la ecuación 2.4, relaciona el valor del voltaje de  $3\omega$  con la CT y el calor específico Cp.

$$V_{3\sigma}(t) \approx \frac{4I^3 LRR'}{\pi^4 k S_{\gamma} \sqrt{1 + (2\omega\gamma)^2}} \qquad \gamma \equiv \frac{L^2}{\pi^2 \alpha} \quad ; \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$
(2.4)

Donde *L* es la longitud del puente, R es la resistencia inicial (a temperatura ambiente) de la estructura, R' es la fluctuación de la resistencia debido a la variación de la temperatura en  $2\omega$ ,  $\rho$  es la densidad de masa de la muestra,  $\gamma$  es la constante de tiempo térmica, *S* es el área de la sección transversal de la muestra,  $\alpha$  es la difusividad térmica, y *C*<sub>p</sub> es calor especifico La técnica  $3\omega$  puede realizarse para un rango amplio de frecuencias. Sin embargo, a frecuencias relativamente bajas de  $\omega$ , donde la longitud de onda es mucho más grande que la longitud de la estructura, el término  $\omega\gamma$  de la ecuación 2.4 se aproxima a cero y el resultado es que el voltaje de  $3\omega$  se vuelve independiente de la frecuencia. Tomando esto en cuenta la CT puede determinarse fácilmente, midiendo la porción en fase del voltaje  $3\omega$  [16]. Las frecuencias  $\omega$  que se utilizaran para las pruebas serán fijadas en el rango de 1Hz a 1kHz. Por lo tanto se ajustaron las longitudes de los puentes para que satisficieran este criterio. Así mismo, tomando en cuenta una temperatura de 300K a 450K, las longitudes de los puentes son L=600, 750 y 1000 $\mu$ m. En la figura 2.15 se muestra el diseño del layout de los tres puentes



Figura 2.15. Layout de los puentes diseñados para medir las propiedades térmicas.

Por otro lado, se propone que las mismas estructuras se puedan utilizar para medir la resistividad eléctrica  $\rho_e$  del Poly-si. La Ecuación 2.8 calcula la resistencia eléctrica R del puente en estado estable (Corriente DC) a temperatura estable.

$$R = \frac{\rho_e}{wt} L \tag{2.4}$$

Donde *w* es el ancho del puente, *t* es el espesor de polisilicio y *L* es su longitud. La metodología utilizada para extraer la resistividad eléctrica, es similar a la que se ha explicará para extraer el módulo de Young. De la ecuación 2.8 se puede derivar la siguiente relación lineal R = mL. Al medir la resistencia eléctrica de las tres estructuras, a temperatura estable y con una corriente DC, se obtendrán tres valores de resistencia. Estos valores se pueden trazar en una gráfica como una función de la longitud *L*. Posterior a la gráfica, la pendiente puede calcularse mediante un ajuste para obtener el valor de  $\rho_e$ , tal como lo expresa la ecuación 2.4

$$\rho_e = wt \, m \tag{2.4}$$

# 2.5. Diseño del chip PolyMEMS VII.

El chip PolyMEMS VII se construye sobre un sustrato de silicio cristalino (100); para este trabajo el dopado del sustrato no es relevante, puesto que la fabricación es de tipo superficial. El sustrato es cortado en dados con dimensiones de 4000 x  $4000\mu m^2$ , como se muestra en la figura. 2.14. El chip presenta geometrías tan pequeñas como 5µm, con una dimensión de lambda de 1µm. La relación de aspecto mínima que se puede alcanzar en la sección transversal de las microestructuras es 1:1.6 para estructuras de Poly-si de 3µm de espesor.



Figura 2.16. Diseño del chip PolyMEMS VII. En la imagen se muestra la distribución de los grupos de estructuras incluidas enumeradas en color rojo.

El chip contiene 5 grupos diferentes de estructuras. El primer grupo fue diseñado para medir las propiedades térmicas de conductividad ( $\kappa$ ) y calor específico ( $C_p$ ); Las estructuras contenidas en los grupos 2, 3, 4 y 5 fueron diseñados para medir el módulo de Young (E), los EMRC ( $\pm \sigma$ ), y los GEM ( $\pm \Delta \epsilon$ ). Las estructuras de los grupos 1, 2, 3 y 5 consistirán de

estructuras suspendidas en sobre cavidades en el sustrato; se empleará una técnica de fabricación combinada de micro maquinado superficial y de volumen.

Para la fabricación del chip se empleará un conjunto de tres niveles de mascarillas, mostradas en la Figura. 2.17. La primera mascarilla define el anclaje mecánico de las microestructuras sobre el sustrato; el anclaje se realizará a través del Vidrio de Fosforo Silicato (PSG) de sacrificio. La segunda mascarilla se utiliza para definir cada una de las microestructuras de prueba; la definición de las estructuras se realizará mediante grabado seco por RIE. La tercera mascarilla define la protección de las estructuras en el óxido de sacrificio; al mismo tiempo define el área que será removida mediante micro maquinado de volumen, para crear las cavidades sobre las cuales, estarán suspendidas las estructuras.



Figura 2.17. Tres niveles de mascarillas usadas en la fabricación del chip PolyMEMS VII.

## Referencias del capítulo.

- F. Quiñones, D. Diaz, A.et al, Estudio de Esfuerzos Mecánicos Residuales sobre monitores integrados en el chip PolyMEMS V-INAOE, IBERCHIP, Bogotá, Colombia, Febrero 2011, pag 1-4.
- [2] F. Quiñones Novelo, *Desarrollo y caracterización de microestructuras Joule con polysilicio*, Tonanzintla Puebla, México, 2009, pp. 10-15,17-40,72-74.
- [3] Alanís Andrés, *Desarrollo del Proceso de Fabricación PolyMEMS INAOE*, INAOE, Tesis de Maestría, 2008.
- [4] P.J. French, *Polysilicon: a versatile material for microsystems*, Sensors and Actuators A, 99, (2002), 3–12.
- [5] Laconte, J., Flandre, D., Raski, D., *Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration*, Springer, 2006, Pág 48-50.
- [6] Duanqin Zhang, Jinkui Chu, *Mechanical characterization of post-buckled micro-bridge beams by micro-tensile testing*, Microsystem Technology, Springer", 16, 2010, 375–380.
- [7] Matthew A. Hopcroft, William D. Nix, and Thomas W. Kenny, *What is the Young's Modulus of silicon?*, Journal Of Microelectromechanical Systems, Vol. 19, NO. 2, 2010, 229.
- [8] Raj K. Gupta, Electrostatic Pull-In Test Structure Design For In-Situ Mechanical Property Measurements Of Microelectromechanical Systems (MEMS), PhD Tesis, The Massachusetts Institute of Technology, June 1997.
- [9] E.H. Yang, H. Fujita, *Determination of the modification of Young's modulus due to Joule heating of polysilicon rnicrostructures using U-shaped beams*, Sensors and Actuators A, 70, 1998, 185-190.
- [10] Peter M. Osterberg, Stephen D. Senturia, *M-TEST: A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures*, Journal Of Microelectromechanical Systems IEEE, Vol. 6, No. 2, June 1997, 107-118.
- [11] M. Zeeshan Siddiqui, Fawad Tariq, Nausheen Naz, M. Fahad Ahmed, *Determination of Young's Modulus of Metallic and Composite Materials by Digital Image Correlation*, Journal of Space Technology, Vol 1, No. 1, July 2012, 32-37.
- [12] Wouters, R. Puers, *Determining the Young's modulus and creep effects in three different photo definable epoxies for MEMS applications*, Sens. Actuators A: Phys. 2009, doi:10.1016/j.sna.2009.03.021.
- [13] M. Asheghi, K. Kurabayashi, et al, *Thermal conduction in doped single-crystal silicon films*, Journal of Applied Physics, Volume 91, Number 8, 2002.
- [14] Timothy S. English, Justin L. Smoyer, John C. Duda, *Modeling Grain Boundary Scattering And Thermal Conductivity Of Polysilicon Using An Effective Medium Approach*, Proceedings of the ASME/JSME, 8<sup>th</sup>, 2011, AJTEC2011.
- [15] S. Uma, A. D. McConnell, et al, *Temperature-Dependent Thermal Conductivity of Undoped Polycrystalline Silicon Layers*, International Journal of Thermophysics, Vol. 22, No. 2, 2001.
- [16] Patrick E. Hopkins, Leslie M. Phinney2, Thermal Conductivity Measurements on Polycrystalline Silicon Microbridges Using the 3ω Technique, Journal of Heat Transfer, APRIL 2009, Vol. 131, DOI: 10.1115/1.3072907

# Capítulo 3 Fabricación del circuito integrado PolyMEMS VII.

## 3.1 Introducción.

En éste capítulo, se presentan el proceso de fabricación del chip PolyMEMS VII empleando el proceso PolyMEMS-INAOE. El chip se construye sobre un sustrato de silicio cristalino (100); para este trabajo el dopado del sustrato no es relevante, puesto que la fabricación es de tipo superficial. Como se mencionó en capitulo anterior, para la fabricación del chip se empleará un conjunto de tres niveles de mascarillas. La mascarilla 1 se utiliza para definir la base de anclaje de las estructuras. La mascarilla 2 se emplea para definir las estructuras de prueba; y por último la mascarilla 3 se utiliza para definir el área de protección de las estructuras durante la definición de las cavidades.

Por otra parte durante el desarrollo del proceso de fabricación del chip, se revisó y optimizó el módulo de fabricación de grabado por RIE de las estructuras en el Poly-si. Así mismo se propone un módulo de micro maquinado en volumen en seco por ICP-RIE.

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

# **3.2 Descripción simplificada del proceso de fabricación del chip PolyMEMS VII.**

El proceso de fabricación completo se describe por etapas en la figura 3.1. A continuación

se presenta el proceso completo comenzando con un resumen del mismo. Seguidamente se

estudiará con más detalles los módulos de fabricación que se consideran críticos.

## Observar figura 3.1 Sección (a)

- 1. La fabricación comienza con el desengrasado y las limpiezas RCA estándar del sustrato.
- 2. Crecimiento de óxido de silicio SiO<sub>2</sub>, ~3000Å, a una temperatura de 1100°C.
- 3. Depósito de Poly no dopado de 0.5µm de espesor por LPCVD a 650°C.
- 4. Depósito de una película de PSG de 2.5µm de espesor, por APCVD a 450°C.
- > Observar figura 3.1 Sección (b)
- 5. Grabado seco por RIE con CF<sub>4</sub>, del PSG para definir el anclaje de las estructuras. Se utiliza la primera mascarilla del chip, para definir las ventanas de anclaje.

# > Observar figura 3.1 Sección (c)

- 6. Depósito de Poly por LPCVD a 650°C. Se depositan tres espesores diferentes, 1, 2 y 3μm.
- 7. Dopado n + de las películas de Poly con fósforo a 1000°C.
- 8. Definición de estructuras mediante grabado seco en RIE, utilizando  $SF_6$  y  $O_2$  en proporción de 1.5:1. Se utiliza la segunda mascarilla del chip.
- 9. Tratamiento térmico para disminuir los EMR del Poly, a 1000°C

# > Observar figura 3.1 Sección (d)

- 10. Depósito de una película de PSG de 3µm de espesor por APCVD a 450°C.
- 11. Depósito de una película de Aluminio de 1000Å de espesor, por evaporación.
- 12. Grabado húmedo del aluminio por Al-Etch. Se utiliza la mascarilla tres para definir la protección de las estructuras y el área activa a micro maquinar.

# > Observar figura 3.1 Sección (e).

13. Grabado del PSG de 3µm, utilizando CF4, para completar la protección de las estructuras.

# > Observar figura 3.1 Sección (f).

- 14. Se definen cavidades de 40µm de profundidad, mediante grabado seco isotrópico en RIE, utilizando SF<sub>6</sub> y O<sub>2</sub> en proporción de 5:1. El micro maquinado de las cavidades se realiza con la profundidad especificada, como característica el óxido de soporte de los voladizos no se graba completamente.
- 15. En este punto las obleas son cortadas en dados con dimensiones de 6000x6000  $\mu$ m<sup>2</sup>; utilizando la cortadora de disco.

# > Observar figura 3.1 Sección (g).

- 16. Se continúa con el paso 13 para terminar de grabar la cavidad, y liberar parcialmente las estructuras.
- 17. Por último se realiza el proceso final de liberación húmeda para eliminar el material de protección (Aluminio y PSG). Todo el proceso es realizado con las muestras sumergidas, subsecuentemente en las soluciones grabantes (Al-Etch y HF al 49%), hasta el secado en un horno de convección a 120°C.



Figura 3.1. Etapas principales en el proceso de fabricación del chip PolyMEMS VI.

En las siguientes secciones se describe a detalle cada paso de fabricación del chip PolyMEMS, así mismo se presentan recomendaciones y observaciones pertinentes. Todas las etapas del proceso se desarrollan con sus respectivos pilotos de prueba.

## 3.3. Descripción de los Pasos 2 al 4.

Fernando J. Quiñones Novelo

En el paso 2 se realiza la primera oxidación del proceso figura 3.1 (a). Las condiciones de oxidación son las siguientes: Temperatura=1100°C por un tiempo=30min en ambiente de vapor de agua; posteriormente se realiza un densificado en  $N_2$ = 60sccm por un tiempo=30min. Con estas condiciones se alcanzó un oxido de 3200Å, medido por elipsometría. Es pertinente mencionar que es la única ocasión en la que la temperatura supera los 1000°C, porque en estudios anteriores [1], se ha demostrado que la temperatura de 1000°C, mantiene en óptimas condiciones las propiedades estructurales del Poly (tamaño de grano, orientación preferencial, rugosidad, etc.).

En el paso 3 se deposita una película delgada de Poly no dopado de 500nm en el horno de LPCVD, esta película tiene el propósito de aislar eléctricamente las estructuras del sustrato. Las condiciones del depósito son las siguientes: Temperatura=650°C, Presión=1.565Torr, Gas=Silano [SiH<sub>4</sub>] al 5% balance de Nitrógeno [N<sub>2</sub>], tiempo=30min. El espesor de la película fue medida en t=550nm en promedio. La medición fue realizada por medición de escalón, mediante el equipo VECCO del laboratorio. En el sistema de depósito, las muestras y los pilotos fueron colocados intercalados para asegurar uniformidad en el depósito. La razón de depósito por lo tanto fue calculado en  $r_D$ =18.33nm/min.

En el paso 4 se deposita una película de  $2.5\mu$ m en el horno de APCVD. En el proceso primero se deposita una película de SiO<sub>2</sub> ~4000Å; esto es para crear una película intermedia entre el Poly y la película de PSG. Esta película intermedia, evita que los dopantes de fósforo presentes en el PSG se re difundan hacia el Poly. El depósito de SiO<sub>2</sub> y del PSG se realiza consecutivamente dentro del mismo horno. Las condiciones del proceso son: Temperatura=450°C, Nitrógeno [N<sub>2</sub>]=80sccm, Silano [SiH<sub>4</sub>]=125ss, Oxigeno [O<sub>2</sub>]=8ss, Fosfina [PH<sub>3</sub>]=13ss, tiempo=25min. Posteriormente se realiza un proceso térmico en ambiente de vapor de agua por 30min y posteriormente en N<sub>2</sub>=45ss por 20min. El espesor de la película fue medida en t=2490nm en promedio. La razón de depósito por lo tanto fue calculado en r<sub>D</sub>=99.6nm/min.

#### 3.4. Descripción del Paso 5.

En el paso 5 [figura 3.1 (b)] se realiza la apertura de las ventanas de anclaje a través del PSG. Para este proceso se utiliza la *mascarilla 1* y los patrones se transfieren mediante la resina negativa (-) AZ 2070. El PSG se graba por un proceso en seco en RIE para asegurar un grabado anisotrópico. El grabado húmedo con soluciones de HF no se utiliza, porque al tratarse de una película de 2.5µm de espesor (relativamente gruesa), se presenta un grabado isotrópico; que posteriormente, provoca un depósito desuniforme de las películas de Poly. En la figura 3.2 se ilustra este problema, se observa un depósito de polisilicio sobre PSG que fue grabado mediante procesos húmedo.



Figura 3.2. Película de Poly depositado, sobre PSG que fue grabado en HF 7:1. Se observa que el PSG fue sobre grabado de manera irregular.

El grabado de PSG se realizó en el equipo Technics Micro RIE-800. Se realizaron diversas pruebas de grabado hasta obtener las condiciones de grabado isotrópico y velocidad de grabado adecuados. El gas utilizado fue Tetrafloruro de Carbono [CF<sub>4</sub>]; este gas favorece un grabado controlado [2]. Las condiciones del proceso son las siguientes: Gas=CF<sub>4</sub>, Presión=225mTorr, Potencia=275W, tiempo=45min. La razón de grabado fue calculado en  $r_G=553$ Å/min.

Recomendaciones: en la figura 3.3 se muestra una fotografía que ejemplifica como deben colocarse las muestras para el proceso de grabado. En la práctica se demostró que colocando obleas de complemento en la periferia (*dummies*), se disminuye el efecto de desuniformidad en el grabado de las muestras. Este efecto siempre se presenta cuando no se utilizan estas obleas de complemento; es decir, mientras que en el centro se obtiene el grabado esperado, en las orillas siempre se observa una razón diferente de grabado.



Figura 3.3. Colocación de obleas *dummies* alrededor de las muestras producto para asegurar un grabado uniforme.

### 3.5. Descripción de los Pasos 6 al 9.

En el paso 6 se realiza el depósito de Polisilicio estructural en el horno de LPCVD, el cual se describe en la figura 3.1 (c). Se realizaron 3 depósitos diferentes para obtener grosores de 1, 2 y 3 $\mu$ m. Se utilizaron 2 obleas para cada espesor, junto con sus respectivas obleas piloto. Las condiciones de depósito son: Temperatura=650°C, Presión=1.565Torr, Gas=SiH<sub>4</sub> al 5% en balance de N<sub>2</sub>. Los tiempos de depósito, espesores, y razones de depósito se muestran en la tabla 3.1.

	Tiempo de depósito [hrs]	Espesores medidos [nm]	Razones de depósitos [Å/min]
Muestras de 3µm	3	2950	163.88
Muestras de 2µm	2	1993	166.08
Muestras de 2µm	1	993	165.5

Tabla3.1. Valores de tiempo, espesores y razones de depósitos del paso 6.

El paso 7 corresponde al dopado del Poly, y se realizó en el horno de difusión térmica con Fosfina para obtener un Poly n+. Las condiciones del dopado son: Temperatura=1000°C, N<sub>2</sub>=25ss, O<sub>2</sub>=10ss, PH<sub>3</sub>=15ss. Las muestras de Poly con espesor de 3µm fueron dopadas por un tiempo de 50 min, para las muestras de 2µm el tiempo fue de 40min y para las muestras de 1µm el tiempo fue de 20min. En la tabla 3.2 se muestran los valores medidos de resistencia laminar. Estas mediciones resultaron estar entre los valores esperados para el proceso PolyMEMS-INAOE (en el rango de 4 a  $15\Omega/\Box$ ). La figura 3.4 muestra los puntos de medición de resistencia laminar efectuadas a las muestras y pilotos. Las mediciones fueron realizadas en la periferia de las muestras, para no dañar la superfície de los dispositivos de interés. Las magnitudes mostradas en la tabla corresponden a valores promedio calculados entre las dos muestras y su correspondiente piloto.

Tabla 3.2 Medición de Resistencia laminar [ $\Omega/\Box$ ].

	1	2	3	4
Muestras de 3µm	4.577	4.467	4.487	5.002
Muestras de 2µm	6.882	6.441	6.156	6.547
Muestras de 1µm	6.882	6.772	6.547	6.930



Figura 3.4. Regiones de medición de la resistencia laminar efectuadas a las muestras.

El paso 8 corresponde al grabado del Poly para definir las estructuras de prueba del chip PolyMEMS VII. Este paso se presenta en la figura 3.1 (c) y es el más crítico durante el proceso de fabricación; porque de éste depende una transferencia fiel de los patrones.

Se utilizó grabado en seco por RIE, y se aplicó la técnica de "Black Silicon" [3] para encontrar las condiciones de grabado que permitieron obtener perfiles anisotrópicos (verticales). La temperatura de la muestra es muy importante para obtener perfiles verticales [3]. Se ha reportado en [3, 4, 5, 6] que cuando una muestra está a temperatura ambiente y se calienta por efecto del grabado en RIE, las muestras se tornan más reactivas y el perfil de grabado tiende a ser isotrópico. Ver figura 3.5. Incluso el autor en [3] recomienda realizar los grabados, con las muestras enfriadas a temperaturas bajo cero Centígrados; sin embargo en el laboratorio no es posible lograr estas condiciones, debido a las características del equipo. No obstante, las muestras si fueron enfriadas a temperaturas de 1 a 4°C. Las condiciones de grabado aplicadas a este paso son las siguientes: Presión=12mTorr, Potencia=200W, Exa Fluoruro de Azufre [SF<sub>6</sub>]=14sccm, Oxigeno [O<sub>2</sub>]=8.5sccm. En la tabla 3.3 se muestran los tiempos y razones de gradado para cada espesor. Cabe mencionar que los grabados se realizaron en sesiones o lapsos de 5 min y no de manera continua; para evitar que las muestras se calentaran durante el grabado, dejándolas enfriar dentro del RIE durante 5min. También es pertinente mencionar que las muestras deben colocarse junto con las obleas dummies, para evitar el efecto de grabado desuniforme como se mencionó en la sección anterior. Ver figura 3.7.



Figura 3.5. Efectos de una alta temperatura durante el grabado en RIE.



Figura 3.6. Efectos de un alto Voltaje de DC-BIAS durante el grabado en RIE.

	Tiempo de grabado [min]	Razón de grabado [nm/min]
Muestras de 3µm	17 min	173.5
Muestras de 2µm	11min 30seg	173.3
Muestras de 1µm	5min	198.6

Tabla 3.3. Tiempos y razones de grabados del Poly estructural en RIE.



Figura 3.7. Colocación de las muestras dentro de la cámara de RIE.

Durante el grabado es importante atender a parámetros como el voltaje de auto polarización del plato (DC-Bias). Es importante mencionar que cuanto mayor sea el voltaje, los iones dentro del plasma se tornan más energéticos y golpearán la superficie de las muestras con mayor energía, lo que provocará perfiles irregulares [3]. Ver figura 3.6. Los perfiles obtenidos con el proceso de grabado se muestran en la figura 3.8, que corresponden a fotografías tomadas en el SEM. Para este proceso se utiliza un voltaje de DC-Bias entre 120 a 140v, con esto se asegura un grabado anisotrópico.



Figura 3.8. Fotografías de los perfiles obtenidos con el SEM.

Por otra parte, es importante mencionar que se utilizó Óxido de silicio [SiO<sub>2</sub>] y Aluminio [Al] como enmascarantes del proceso. El SiO<sub>2</sub> fue crecido en el horno de oxidación a 900°C en ambiente de vapor de agua durante 70min, y posteriormente fue densificado en N2=45ss durante 20 min. El espesor obtenido fue de 2060Å. Subsecuentemente, se depositó Aluminio con un espesor de 1000Å. Se utilizó la resina (+) AZ4533 para transferir los patrones de la *mascarilla número 2* al Aluminio y al Oxido. El Aluminio fue grabado mediante solución húmeda Al-Etch, a una temperatura de 40°C por 1min 20seg. El óxido fue grabado mediante RIE utilizando las mismas condiciones descritas en la sección 3.4, durante un tiempo de grabado de 5min. La razón de grabado fue calculada en r<sub>G</sub>=412Å/min.

Por otra parte, el paso 9 corresponde a un tratamiento térmico aplicado a las estructuras ya definidas. Siguiendo el procedimiento establecido en trabajos previos [7, 8, 9], el tratamiento térmico se realiza para disminuir los EMR que se generan durante la fabricación del chip. Las condiciones del tratamiento térmico son: Temperatura=1000°C, tiempo=120min, en ambiente de N<sub>2</sub>=40ss. Las mediciones de los EMR se presentan en el capítulo 4.

## 3.6. Descripción de los Pasos 10 al 13.

El paso 10 se realiza el depósito de PSG sobre las estructuras de Poly. Esta película tiene el propósito de crear un recubrimiento de protección para los pasos subsiguientes. Las condiciones de depósito y reflujo son exactamente iguales a las discutidas en la sección 3.3; el tiempo de depósito fue de 35min. El espesor medido fue de 3153nm; la razón de depósito fue calculado en  $r_G=90$ nm/min.

Los pasos 11, 12 y 13 corresponden a un depósito de Aluminio de 1000Å sobre el PSG mediante evaporación. Se utilizó la resina (+) AZ4533 para transferir los patrones de la *mascarilla número 3* al Aluminio. El Aluminio fue grabado mediante solución húmeda Al-Etch, a una temperatura de 40°C por 1min 20seg. El óxido fue grabado mediante RIE utilizando las mismas condiciones descritas en la sección 3.4, durante un tiempo de 60min. La razón de grabado fue calculada en  $r_G=525.5$ Å/min. Cabe mencionar que el grabado se realizó en sesiones de 10min para evitar el calentamiento excesivo de las muestras. El tiempo de enfriamiento entre cada sesión fue de 7 min. El plato fue enfriado a una temperatura de 4°C.

### 3.7. Descripción de los Paso 14, 15 y 16.

En el paso 14 se realiza el micro maquinado de volumen para formar las cavidades por debajo de las estructuras. Este paso resulta ser crítico en la fabricación del Chip. El proceso se proyectó para formar cavidades con una profundidad mayor a 40µm. La profundidad de estas cavidades permitirá la oscilación mecánica de los trampolines durante la medición del módulo de Young. Además las cavidades crean un aislamiento térmico entre el sustrato y los puentes del grupo 1, durante la medición de las propiedades térmicas.

El grabado se realizó por RIE-ICP, porque al agregar un acoplamiento inductivo, el plasma se torna más denso y aumenta la razón de grabado [9]. Con las condiciones adecuadas se puede realizar un grabado isotrópico con una selectividad aceptable. Después de realizar 10 pruebas de grabado, se logró ajustar las condiciones para obtener las cavidades deseadas. Las condiciones de grabado son las siguientes: Presión Base= -0.0003Torr, SF<sub>6</sub>=50sccm,  $O_2$ =10sccm, Presión de Grabado=5mTorr, Potencia del ICP=500W, Potencia del RIE=200W. Para confirmar un grabado isotrópico con estas condiciones, se observaron muestras grabadas por 35min en el SEM; ver la figura 3.9. Después de observar y medir, se determinó una razón de grabado vertical de  $R_{GV}$ =950nm/min y una razón de grabado lateral de  $R_{GL}$ =400nm/min, lo que confirma el grabado isotrópico. En la fotografía también se observa el PSG que recubre las estructuras, y tal como se aprecia en la imagen, se conserva poco afectado, lo que confirma una buena selectividad.



Figura 3.9. Grabado isotrópico de la cavidad debajo de un trampolín. En la fotografía se observa las capas de protección alrededor de la estructura de Poly.

El grabado se realizó en sesiones de 5 min y se dejó enfriar por 5min. La temperatura del plato y las muestras se deben mantener cerca de los 4°C o inferior; como ya se ha mencionado en secciones anteriores. También, deben ser grabadas junto con obleas *dummies* de silicio para evitar efectos de desuniformidad; algo que no se ha mencionado hasta el momento es que las obleas *dummie*, deben aumentar el área efectiva de la muestra a grabar en por lo menos un 25%. Es decir, si se introduce una oblea completa de 2 pulgadas de diámetro, se deben colocar piezas de obleas alrededor de la muestra, para que el área efectiva total del grabado aumente en al menos 2.25 pulgadas. El área efectiva de grabado no es la totalidad de la muestra, sino que es la suma de las áreas expuestas al grabado. Por supuesto que es difícil determinar el área efectiva, por lo que el tamaño de las piezas *dummie* se calculan de manera aproximada.

Siempre se consideró cortar las obleas en dados, con el fin de poder manipular las muestras por separado; se tomó en cuenta que la cortadora automática del laboratorio, utiliza agua DI para lubricar y que las estructuras suspendidas podrían colapsarse durante el corte. Para evitar lo anterior, se interrumpió el proceso de grabado en un paso intermedio. Es decir el grabado se suspendió hasta el punto en que las estructuras más delgadas quedaran soportadas solo por una mínima cantidad de material de sacrificio. Ver figura 3.10. Las estructuras más delgadas corresponden a trampolines y puentes de 30µm de ancho. El tiempo calculado para lograr un pequeño soporte fue de 25min. En la tabla 3.4 se muestra los parámetros de fabricación capturados durante las primeras 5 sesiones de grabado o los primeros 25min. Después de este tiempo de grabado, se cortaron las muestras en dados de 6000x6000µm<sup>2</sup>.

Sesiones	1	2	3	4	5
Tiempo	5 min				
Potencia reflejada ICP	49 W	45 W	44 W	44 W	42 W
Potencia reflejada RIE	2.6 W	2.7 W	2.6 W	2.8 W	2.7 W
DC-Bias RIE	47 V	41 V	40 V	40 V	40 V
Posición de la válvula	43.9	42.3	42.0	41.8	41.8
Posición del capacitor Tune ICP	6.8 %	6.8 %	6.8 %	6.9 %	6.8 %
Posición del capacitor Load ICP	91.3 %	91.3 %	91.3 %	91.3 %	91.3 %

#### Fernando J. Quiñones Novelo



Figura 3.10. Detalle del grabado después de 25min. Se observa que la estructura de 30um de ancho, continúa soportada por el material de sacrificio.

Posterior al corte se continuó con el micro maquinado de las cavidades, con las mismas condiciones de grabado. Los dados fueron divididos en muestras para liberar trampolines y puentes; esto es así, porque el tiempo para liberar un trampolín es mayor que para liberar un puente, debido a la diferencia en sus dimensiones, ya que los trampolines so de mayor ancho. El tiempo adicional de grabado para liberar trampolines fue de 16min, y para liberar los puentes fue de 5min. Por su puesto que se pueden liberar ambas estructuras al mismo tiempo, sin embargo, se debe tener cuidado con los puentes que son los más susceptibles a dañarse por la degradación de su protección.

En la figura 3.11 se muestra imágenes de SEM, de puentes y trampolines parcialmente liberados. Se aprecia la protección del PSG y de algunos remanentes de Aluminio.



Figura 3.11. Estructuras parcialmente liberadas. Se observa la protección de PSG que recubre al Poly.

El último paso consiste en la remoción de las películas de protección para liberar completamente las estructuras. La liberación se realizó mediante un proceso de grabado húmedo con HF. Primordialmente, las muestras son sumergidas en una solución de Al-Etch para eliminar los remanentes de Aluminio. Enseguida, se cambia la solución grabante, por una solución de ácido HF al 49%. Posteriormente, las muestras son sometidas a una serie de enjuagues en Agua-DI e Isopropanol. Por último, las muestras son secadas en un horno de convección. Para el proceso de liberación se emplea un cono de separación resistente al ácido HF. La temperatura de todo el proceso es de 60°C, para disminuir las tensiones superficiales de las soluciones involucradas [10, 11]; con el fin de evitar o minimizar los eventos de colapsos en las estructuras suspendidas. A continuación se listan los pasos para el procedimiento de liberación mecánica.

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

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

Se logró completar la fabricación con éxito de 15 muestras de cada espesor, dando un total

de 45 muestras.

## Referencias del capítulo.

- [1] A. Alanís Navarro, "Desarrollo del proceso de fabricación PolyMEMS-INAOE", Tonantzintla Puebla, México, 2008.
- [2] K. H. Park, Sangsuk Lee, et al, *The effect of CF4 and CHF3 gas on the etching characteristics of Er-doped glass*, Journal Of Materials Science Letters 20, 2001, 565–568.
- [3] Henri Jansen, Meint de Boer, et al, *The black silicon method: a universal method for determining the parameter setting of a fluorine-based reactive ion etcher in deep silicon trench etching with profile control*, Journal Micromech. Microeng; 5, 1995, 115-120.
- [4] H. Zou, *Anisotropic Si deep beam etching with profile control using SF6/O2 Plasma*, Microsystem Technologies, 10, 2004, 603–607.
- [5] F Gaboriau, G Cartry, M-C Peignon and Ch Cardinaud, Etching mechanisms of Si and SiO2 in fluorocarbon ICP plasmas: analysis of the plasma by mass spectrometry, Langmuir probe and optical emission spectroscopy, J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 1830–1845
- [6] B. D. Pant, U. S. Tandon, *Etching of Silicon Nitride in CCl2F2, CHF3, SiF4, and SF6 Reactive Plasma: A Comparative Study*, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 19, No. 4, 1999.
- [7] F. Quiñones1, D. Diaz, et al, *Micromaquinado Superficial con Polisilicio y su Aplicación* en Microestructuras Joule, IBERCHIP, 2010.
- [8] F. Quiñones Novelo, *Desarrollo y caracterización de microestructuras Joule con polysilicio*, Tonanzintla Puebla, México, 2009.
- [9] J. Kiihama.ki and S. Franssila, *Deep silicon etching in inductively coupled plasma reactor for MEMS*, Physica Scripta. Vol. T79, 250È254, 1999.
- [10] Tas, N., Sonnenberg, T., Jansen, H., et al, *Stiction in Surface Micromachining, J. of Micromechanical Engineering*, 6, 1996, Pág. 385-390.
- [11] Lides, D., Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 1993, Pág. 6-127-129

# Capítulo 4 Resultados experimentales.

# 4.1 Introducción.

En éste capítulo, se presentan los resultados experimentales de la caracterización mecánica realizada al chip PolyMEMS VII. Primero se presentan los resultados generales y análisis cualitativo obtenido de la fabricación del chip. Posteriormente se presenta una sección dedicada a la descripción del esquema de medición, que se montó en los laboratorios de óptica del INAOE para cuantificar el módulo de Young. Por último se presentan los resultados cuantitativos obtenidos de las muestras.

# 4.2. Resultados generales y análisis cualitativo.

La Figura 4.1 muestra una fotografía del chip PolyMEMS-VII tomada con un microscopio óptico a un zoom de 25x. Como se observa en la fotografía, todas las estructuras se construyeron y se liberaron con éxito. Aunque se recomienda realizar por separado el micro maquinado de las cavidades para los puentes y trampolines. Esto demuestra que es posible liberar todas las estructuras del chip en un solo proceso. Como se mencionó anteriormente, se construyeron 15 dados de cada espesor (1 $\mu$ m, 2 $\mu$ m, 3 $\mu$ m). En todos los dados se obtuvo un procedimiento de liberación sistemático. Se realizaron mediciones de profundidad de las cavidades en todos los chips liberados, como resultado se obtuvo un promedio de 43.5 $\mu$ m; El tiempo promedio de grabado para liberar los trampolines fue de 41min. Lo que da una razón de grabado isotrópico promedio de r<sub>G</sub>≈1 $\mu$ m/min.



Figure 4.1. Fotografía del Chip PolyMEMS VII tomada a través de un microscopio óptico a un zoom de 25x.

La figura 4.2 muestra los aspectos de fabricación de un arreglo de puentes liberados del grupo número 2. Las fotografías muestran puentes de  $2\mu$ m de espesor suspendidos sobre la cavidad micro fabricada. La figura 4.2 a) y b) corresponde a fotografías tomadas con SEM, donde las se observa claramente las deformaciones o *Bucklings* debido a la presencia de esfuerzos residuales de compresión. Las fotografías c) y d) de la figura 4.2, muestran las imágenes de estos mismos puentes, tomadas con un microscopio óptico usando un filtro óptico; que permite resaltar el relieve del efecto *Buckling*, haciéndolos fácilmente identificables. Las regiones de color más brillante (color amarillo), indican una deflexión hacia arriba, mientras que las regiones de color obscuro (color marrón-azul obscuro), indica deformaciones hacia abajo. Las regiones de color azul claro indican un nivel neutro de las estructuras. Las fotografías a) y c) corresponden al arreglo de puentes de 15 $\mu$ m de ancho; las fotografías b) y d) corresponden al arreglo de puentes de 10 $\mu$ m. Cabe mencionar, que también en las estructuras del grupo 1 se observaron las mismas condiciones de liberación.



Figure 4.2. Observación de los puentes fabricados en el chip PolyMEMS VII. a-b) Fotografías en SEM de los puentes. c-d) Vista de los puentes utilizando un filtro de luz, en un microscopio óptico.

En la figura 4.3 se presentan las fotografías tomadas a un arreglo de trampolines liberados; las fotografías corresponden a un chip fabricado con un espesor de  $3\mu$ m. Las fotografías a) y b) de dicha figura, muestran imágenes de SEM de los trampolines suspendidos; a una distancia igual a la de los puentes. Por debajo de los trampolines se observó material sin grabar en forma de montículos. La separación promedio (medida en todas las muestras) entre la parte superior del montículo y la cara inferior del trampolín es  $\approx 15\mu$ m. También se observó material remanente debajo de los trampolines, que no fue posible remover durante el micro maquinado de volumen. Esto disminuyó la longitud efectiva de cada trampolín; y se tomó en cuenta posteriormente durante las pruebas de vibración para la medición del módulo de Young.

Las fotografías c) y d) de la figura 4.3 demuestran que el arreglo de los trampolines experimentaron una deflexión hacia abajo, lo que implica la presencia de gradientes de esfuerzos residuales o GEMs. Estas deflexiones fueron observadas en todas las muestras liberadas. Cabe mencionar que en los trampolines de mayor longitud, la deflexión fue de tal

magnitud, que los extremos finales de estos quedaron apoyados sobre el material residual debajo de ellos. Esto se observa con mayor detalle en la figura 4.4.



Figure 4.3. Fotografías de los trampolines suspendidos. a-b) Fotografía tomada en SEM. c-d) Vista de los trampolines con un filtro de luz en microscopio óptico.



Figura 4.4. Fotografía en SEM que muestra los trampolines descansando sobre material remanente después de la liberación.

# 4.3. Esquema de medición para el módulo de Young.

Para medir el módulo de Young en los trampolines, se utilizó un esquema de medición, como el que se muestra en la figura 4.5. El esquema de medición está formado por 4 secciones principales, las que se describen a continuación.





Figura 4.5. Diagrama y fotografía del esquema de medición del módulo de Young.

# 4.3.1. Sistema óptico-mecánico.

El sistema óptico consistió de un láser de He-Ne de 632.8nm de longitud de onda; sobre el cual va montada una lente convergente de 4x de amplificación y 20mm de distancia focal. Sobre la lente se montó un diafragma de 1mm de diámetro, cuya función fue la de filtrar y limitar el paso de la luz. Estos dispositivos fueron montados sobre una plataforma mecánica de 4 grados de libertad, para poder realizar ajustes en el enfoque y ángulo de incidencia del haz de luz. La luz proveniente del láser fue dirigida hacia la muestra en un ángulo de 35°, y ajustada para que incida e ilumine el trampolín en estudio. Ver figura 4.6 a).



Figure 4.6. Fotografías generales del esquema de medición.
a) Luz laser roja (632.8nm) incidente sobre la muestra.
b) Detalle del spot de 50μm. c) Sensor óptico OPT101.
d) Tarjeta de adquisición de datos conectada a la PC.

Con este esquema fue posible enfocar un spot ovalado de  $\sim$ 50µm de diámetro. Una separación de 150µm entre cada trampolín permitió utilizar este diámetro de spot sin que se interfirieran las mediciones de cada estructura. Ver figura 4.6 b).

La luz reflejada del trampolín fue recolectada por el sensor óptico electrónico PT101, mostrado en la Figura 4.6 c). El sensor está montado en un soporte móvil de 3 grados de libertad; que permite el ajuste del ángulo de recepción de la luz reflejada por el trampolín. Este sensor es un Circuito Integrado monolítico, en cuyo interior tiene un fotodiodo integrado a un amplificador operacional de trasnconductancia. Esta configuración, permite que la luz detectada por el fotodiodo, se convierta en corriente y posteriormente amplificada en forma de voltaje. Por consiguiente, la magnitud del voltaje es directamente proporcional a la intensidad de luz incidente sobre el sensor. Este voltaje de salida, es dirigido hacia la tarjeta de adquisición de datos para su lectura.

### 4.3.2. Tarjeta de adquisición de datos.

La tarjeta de adquisición de datos, consiste en una tarjeta Arduino MEGA con un microcontrolador ATMeg1280. Ver figura 4.6 d). Esta tarjeta de bajo costo, es ideal para leer y muestrear señales analógicas de voltaje de baja frecuencia. La tarjeta lee el voltaje proveniente del sensor óptico a través de un puerto analógico y envía la lectura a través del puerto USB hacia una PC; que a su vez, procesa la información en un software hecho a medida. La velocidad de muestreo de la tarjeta puede ser configurada desde el software de control.

#### 4.3.3. Generador de funciones y resonador piezoeléctrico.

El generador de funciones es un Tecktronix AFG 3000, y puede ser configurado y controlado a través de un puerto USB. La función del generador es suministrar una señal eléctrica de prueba, de frecuencia variable con una amplitud de 5volts. La señal de prueba es inyectada a un resonador piezoeléctrico que transforma esta señal eléctrica en vibraciones mecánicas. Se utilizó un resonar piezoeléctrico diseñado para vibrar a bajas frecuencias (en el orden de kHz); el resonador fue extraído de un parlante utilizado para reproducir frecuencias de agudos audibles. El resonador fue montado sobre una base de aluminio diseñada y fabricada a medida, para permitir la vibración del resonador. A su vez la base fue montada sobre un microscopio óptico para facilitar las observaciones y ajustes del láser sobre las muestras. Ver figura 4.6 a).
### 4.3.4. PC y software de control.

Se utilizó una PC de arquitectura x86, para controlar el generador de señales, así mismo para almacenar los datos provenientes de la tarjeta de adquisición de datos y para procesar la información. El software que controla todo el sistema de medición, fue programado en la plataforma GUIDE de MATLAB. Ver figura 4.7. El software fue diseñado para establecer una frecuencia de prueba en el generador de funciones; enseguida, realiza una pausa para permitir que el resonador y la muestra vibren a la frecuencia establecida. Posteriormente, realiza la medición de la intensidad de luz y los datos se van graficando en tiempo real.



Figure 4.7. Vista del software programado en GUIDE de MATLAB, para la medición de la frecuencia de resonancia. En la gráfica se observa la variación de intensidad de la luz láser reflejada por el trampolín, durante su régimen de vibración.

El sistema en conjunto mide las variaciones de la intensidad de la luz láser reflejada por el trampolín, mientras se hace vibrar. Cuando el trampolín vibra a una frecuencia correspondiente a su resonancia mecánica, la amplitud de sus vibraciones es tal, que la luz reflejada es dispersada y solo una pequeña porción de esta es dirigida hacia el sensor. Ocurre lo contrario, cuando el trampolín vibra a una frecuencia diferente a la frecuencia de resonancia, las vibraciones de este no son tan grandes, y una gran porción de la luz reflejada es detectada por el sensor. El resultado es una gráfica que muestra un descenso en la intensidad de la luz reflejada, cuando el trampolín vibra a su frecuencia de resonancia. De esta forma se puede identificar la frecuencia de resonancia como se muestra en la figura 4.7.

#### 4.4. Medición del Módulo de Young E.

La medición del módulo de Young, se realizó con el esquema de medición descrito en la sección 4.3. Se midieron 6 trampolines, en cada uno de los 45 dados liberados. Los trampolines medidos son los correspondientes a longitudes de 200um hasta 325um. No fue posible medir los trampolines restantes, porque como se mencionó en la sección 4.2 y se observa en la figura 4.4, la magnitud de su deflexión, provocó que los extremos finales quedaran apoyados sobre el material residual; lo que imposibilitó que los trampolines pudieran moverse libremente.

Las mediciones de resonancia mecánica en cada trampolín, fueron hechas primero, mediante un barrido de frecuencias rápido; con un paso de 100hz y un tiempo de integración en la medición de 0.25seg. Este barrido rápido se realizó con el fin de identificar la frecuencia de resonancia mecánica aparente del trampolín. Para seleccionar un rango de frecuencias adecuado para la medición, se escoge un ancho de banda de acuerdo a los valores predichos por las gráficas de la figuras 2.10, 2.11 o 2.12 del capítulo 2.

Por ejemplo, para un trampolín de 200µm de longitud y 1µm de espesor, la figura 2.10 muestra que se espera que el trampolín resuene en un rango de entre 30kHz a 38kHz, dependiendo de la magnitud del módulo de Young del material. Por lo tanto se escoge un ancho de banda que incluya dicho rango de frecuencias.

Un ejemplo de una primera medición se muestra en la figura 4.8, cuyo barrido de frecuencia se realizó comenzando desde una frecuencia de 30kHz y terminando en una frecuencia de 50Khz. Como se puede observar la frecuencia de resonancia de la estructura, aparentemente se encuentra en 44.5kHz. Sin embargo hay que recordar que el paso entre cada cambio de frecuencia es de 100Hz; esto puede enmascarar el verdadero valor de la frecuencia de resonancia de la estructura, de aquí el hecho, de que sea nombrada como la frecuencia de resonancia "aparente".



Figura 4.8. Medición de resonancia mecánica realizada al trampolín de 1µm de espesor y 200µm de longitud. El ancho de banda fue seleccionado desde 30kHz hasta 50kHz. La frecuencia de resonancia medida aparenta estar en 44.5kHz.

Una vez identificada la frecuencia de resonancia aparente del trampolín, se realizó una segunda medición para medir la frecuencia de resonancia exacta. El paso entre frecuencias fue fijado en 1Hz y el tiempo de integración de la medición, ajustado en 1seg; un ejemplo de esta medición se puede observar en la figura 4.9.

Cabe mencionar, que el ancho de banda fue disminuido, ajustándolo desde 43kHz hasta 45kHz, ya que por obvias razones, no es necesario medir en un rango más amplio. Subsecuentemente, este procedimiento fue realizado en los trampolines restantes y en todas las muestras. Posteriormente, se procesaron los datos para obtener el valor del módulo de Young promedio para los tres espesores.



Figura 4.9. Medición de resonancia mecánica realizada al trampolín de 1um de espesor y 200um de longitud. El ancho de banda fue disminuido, desde 43kHz hasta 45kHz. La frecuencia de resonancia medida fue 43934Hz.

En la figura 4.10 se muestra las mediciones normalizadas de las frecuencias de resonancia obtenidas de los 6 trampolines de 1um de espesor. Se observa claramente el corrimiento de frecuencia de cada trampolín en función de su longitud final.



Figura 4.10. Datos normalizados de las frecuencias de resonancia para los trampolines de 200, 225, 250, 275, 300 y 325µm de longitud (curvas señaladas como C1, C2, C3, C4, C5 y C6 correspondientemente). El espesor de estas estructuras corresponde a trampolines de 1µm.

Al agrupar las mediciones de frecuencias y graficarlas con respecto a  $l^{-2}$  se obtuvo una pendiente como la que se presenta en la figura 4.11. Se observa que los datos siguen una tendencia lineal, por lo que fue posible ajustarlos a una recta. Para encontrar la magnitud del módulo de Young se calculó la pendiente de la recta, y posteriormente se calculó la magnitud del módulo de Young, utilizando la ecuación 1.3 presentada en el capítulo 1. El procedimiento anterior fue realizado para cada uno de los dados liberados. De las mediciones realizadas, se obtuvo un valor promedio para los tres espesores estudiados; por lo tanto, el módulo de Young medido fue de E=154GPa±5GPa.



Figura 4.11. Ejemplo del ajuste de datos experimentales, para un dado con espesor de 1um. El valor de la pendiente fue calculada en m=0.001315, y el valor del módulo de Young calculado en ~154GPa.

Es importante mencionar que se tomó en cuenta que las longitudes de los trampolines fueron disminuidas en un factor de 10% de su valor real. Esta observación fue necesaria debido a que en el análisis cualitativo se detectaron remanentes de material por debajo de los trampolines, lo que disminuyo su longitud efectiva. Ver figura 4.12. Por ejemplo para un trampolín de 200µm, su longitud real fue de 180µm. Por lo tanto en los cálculos realizados se incluyó la disminución de la longitud para todas las estructuras en donde se observó este fenómeno.



Figura 4.12. Vista lateral de trampolines suspendidos. Se observa material remanente que disminuye la longitud efectiva del trampolín.

Por otra parte, como se menciona en el capítulo 1, se ha reportado que una orientación cristalina preferente (OCP) en el grano del Poly-si de <100>, causará que su MY se encuentre en valores cercanos a 150GPa [4]. Este hecho permite suponer que la OCP del Poly-si obtenido en este trabo es <100>, porque el valor medido fue de 154GPa. Además, en los trabajos [1, 2, 3] se reportan valores equivalentes para condiciones de fabricación similares al proceso PolyMEMS-INAOE. En la tabla 4.1 se presenta una comparación del valor medido en este trabajo con el valor reportado por el proceso PolyMUMPs de MEMSCAP. Se observa que el proceso PolyMUMPs obtiene películas de Poly-si con un módulo de Young igual a 169GPa. En ambos procesos los valores se encuentra en alrededor de 5%, del valor típico de 160GPa. Por lo tanto, se infiere que en el laboratorio del INAOE se obtiene un Poly-si de calidad estándar.

Rango	Valor utilizado por	Valor	PolyMUMPS
reportado	los diseñadores.	Medido	
130 a 190GPa	160GPa	154GPa	169Pa

Tabla 4.1. Comparativa del módulo de Young.

#### 4.5. Medición de los esfuerzos mecánicos residuales.

Después de medir el módulo de Young, se midió el esfuerzo mecánico residual de compresión (EMRC), y el gradiente de esfuerzo residual (GEM). Este procedimiento fue realizado mediante la identificación y la medición del *buckling* en los trampolines y en los puentes, utilizando el microscopio óptico y el SEM.

Como se recordará del capítulo 1, para estimar el esfuerzo de compresión en el Poly-si se identifica la estructura puente de menor longitud que presente *buckling*. La longitud de dicha estructura es identificada como longitud crítica  $L_{cr}$ . Subsecuentemente, se mide la magnitud del *buckling* y se calcula el EMRC, utilizando la ecuación 1.5 del capítulo 1.

En los puentes se observaron efectos de *buckling* en las estructuras de 150 $\mu$ m por 1 $\mu$ m de espesor. Después de medir cada dado liberado, se obtuvo un valor promedio para el esfuerzo residual de compresión  $\sigma$ = -17MPa±8MPa. Este valor se encuentra dentro de los valores estándares de fabricación reportados en trabajos anteriores [3, 4]. En la tabla 4.3 se presenta la comparación de los EMRC entre los procesos PolyMEMS-INAOE de 2008 a 2014 y las corridas 18, 50 y 103 de PolyMUMPS. Se concluye que PolyMEMS-INAOE es un proceso de fabricación que alcanza los estándares de estabilidad y calidad de procesos ya consolidados como PolyMUMPS.

Proceso	160GPa	154GPa	169GPa
PolyMEMS-INAOE 3 (2008)	-13.2MPa	-12.7MPa	
PolyMEMS-INAOE 5 (2009)	-13.1MPa	-12.6MPa	
PolyMEMS-INAOE 7 (2014)		-17.0MPa	
PolyMUMPS (Corrida 103)			-11MPa
PolyMUMPS (Corrida 50)			-10MPa
PolyMUMPS (Corrida 18)			-13MPa

Tabla 4.2. Comparación del esfuerzo residual de compresiónentre los procesos PolyMEMS-INAOE y PolyMUMPS.

Por otro lado, en los trampolines se midió el GEM presente en el Poly. Como se recordará, para cuantificar este EMR, se mide la magnitud del *buckling* o deflexión en los trampolines. Posteriormente, utilizando la ecuación 2.6 del capítulo 2, se calcula el valor. Se cuantificó el gradiente de esfuerzo mecánico en las tres películas estudiadas, calculando un valor promedio de  $\Delta \varepsilon$ = -34MPa±4MPa. Este valor comparado con las corridas anteriores del proceso PolyMEMS-INAOE, ver tabla 4.3, resulto estar en un nivel elevado. En la columna dos de la tabla se observan los valores reportados por trabajos anteriores [3, 4, 5], utilizando un módulo de Young de 160GPa. Mientras que en la columna 3, se muestran los valores recalculados para el módulo de Young medido en este trabajo.

Los procesos del 2008 y 2009 demostraron que al aplicar un tratamiento térmico a una temperatura de 1000°C post-dopado, reducen los esfuerzos residuales a magnitudes mínimas. El resultado obtenido en este trabajo sugiere que el micro maquinado de volumen en RIE-ICP, promueve el incremento del gradiente de esfuerzo en las películas estructurales de Polisilicio. El incremento de temperatura debido a la exposición de plasma durante el grabado de las cavidades, puede provocar una modificación en la estructura del grano en el Polisilicio. Esta modificación en la estructura no es uniforme en todo el espesor de la película, si no que se lleva a cabo en las regiones más expuestas al plasma, (parte superior de las estructuras).

entre los procesos PolyMEMS-INAOE.					
Proceso	160GP	154GP			
<b>PolyMEMS 3 (2008)</b>	-8MPa	-7.7MPa			
<b>PolyMEMS 5 (2009)</b>	-10.7MPa	-10MPa			
<b>PolyMEMS 7 (2014)</b>		-34MPa.			

 

 Tabla 4.3. Comparativa del Gradiente de Esfuerzo Residual entre los procesos PolyMEMS-INAOE.

### Referencias del capítulo.

- Sang Woo Lee, Chang Ho Cho, et al, Mechanical Properties of Phosphorus-doped Polysilicon Films, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 33, November 1998, pp. S392\_S395.
- [2] Chung-Seog Oha, Hak-Joo Lee, *Comparison of the Young's modulus of polysilicon film by tensile testing and nanoindentation*, Sensors and Actuators A 117 (2005) 151–158.
- [3] F. Quiñones1, D. Diaz, A.et al, Estudio de Esfuerzos Mecánicos Residuales sobre monitores integrados en el chip PolyMEMS V-INAOE, IBERCHIP, Bogotá, Colombia, Febrero 2011, pag 1-4.
- [4] P.J. French, *Polysilicon: a versatile material for microsystems,* Sensors and Actuators A, 99, (2002), 3–12.
- [5] D. Diaz, F. Quiñones, A.et al, Fabrication of PolySilicon Microstructures using the PolyMEMS INAOE Technology, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, 19-25 June, 2011

# Capítulo 5. Conclusiones y Trabajo Futuro.

## 5.1. Conclusiones.

Se cumplió con el objetivo de diseñar y fabricar el chip de prueba PolyMEMS-VII; destinado para la medición de las propiedades mecánicas y térmicas del Polisilicio. Las estructuras implementadas en el chip, fueron diseñadas utilizando geometrías sencillas (puentes y trampolines voladizos) con el fin de minimizar los cálculos y consideraciones de diseño.

Se logró cuantificar en el laboratorio el módulo de elasticidad (Modulo de Young *E*). Se estudiaron tres espesores de películas: 1, 2, y 3µm; que fueron fabricados utilizando las mismas condiciones de temperatura, presión, flujo de gas, exceptuando los tiempos de depósito. El valor promedio obtenido para los tres espesores estudiados fue E=154GPa±5GPa. Este valor está próximo a lo reportado y utilizado por los diseñadores de MEMS (160GPa). Se cuantificaron los esfuerzos mecánicos residuales en las películas de Polisilicio, utilizando el módulo de elasticidad medido en el laboratorio.

Se cuantificó el gradiente de esfuerzo mecánico en las tres películas estudiadas, calculando un valor promedio de  $\Delta \epsilon$ = -34MPa±4MPa. Este valor comparado con las corridas anteriores del proceso PolyMEMS-INAOE, resulto estar en un nivel elevado. Los procesos del 2008 y 2009 demostraron que al aplicar un tratamiento térmico a una temperatura de 1000°C post-dopado, reducen los esfuerzos residuales a magnitudes mínimas. El resultado obtenido en este trabajo sugiere que el micromaquinado de volumen en RIE-ICP, promueve el incremento del gradiente de esfuerzo en las películas estructurales de Polisilicio.

Se cuantificó el esfuerzo de compresión en los tres espesores estudiados de películas de Polisilicio. El valor promedio calculado para las tres películas fue  $\sigma$ = -17MPa±8MPa. Este valor fue comparado con los procesos anteriores realizados en el laboratorio y con el proceso PolyMUMPS. Se concluye que PolyMEMS-INAOE es un proceso de fabricación que alcanza los estándares de estabilidad y calidad de procesos ya consolidados como PolyMUMPS.

Se revisó el procedimiento de grabado en seco por RIE para definir estructuras en películas de Polisilicio. Con la incursión de O<sub>2</sub>, se logró ajustar el proceso de grabado con SF<sub>6</sub> para definir perfiles anisotrópicos (paredes verticales) con dimensiones de 5µm. Se logró una transferencia fiel de los patrones hacia la película de Poly, utilizando un enmascarante de Oxido de 2000Å y Aluminio de 1000Å de espesor. Asimismo, el proceso de grabado de las películas de PSG fue mejorado, reemplazando el grabado húmedo que antes se empleaba, por grabado seco en RIE con el gas CF<sub>4</sub>. Cabe mencionar que con este gas no se tiene selectividad entre las películas de Poly y PSG, sin embargo es posible controlar la profundidad de grabado, controlando el tiempo de grabado en el proceso.

Se instrumentó e instaló un esquema de medición de bajo costo, orientado a medir el módulo de Young en las muestras de Polisilicio. El esquema emplea la técnica por rastreo de frecuencias de resonancia, que mide la resonancia mecánica en los trampolines diseñados para este fin. El diseño de los trampolines fue orientado para que resonaran a bajas frecuencias en el orden de kilo-Hertz.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, fueron publicados en 4 conferencias internacionales y una revista, que a continuación se enlistan.

F. Quiñones, W. Calleja, F.J. De la Hidalga, *Mechanical characterization of polysilicon cantilevers using a thermo-mechanical test chip fabricated with a combined bulk/surface micromachining technique*, Results in Physics, Elsevier, 2014, RINP-D-14-00067R1.

F. Quiñones, D. Diaz A. et al, *Bulk/Surface Micromachined PolyMEMS Test Chip for the Characterization of Electrical, Mechanical and Thermal Properties*, Proceedings of the IX ICCDCS Conference, Playa del Carmen, Mexico, April 2-4, 2014, 128-133.

D. Diaz A, F. Quiñones, et al, *Fabrication of PolySilicon Microstructures using the PolyMEMS INAOE Technology*, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, June 2011, 19-25, IMD-123

F. Quiñones, D. Diaz A. et al, *Estudio de Esfuerzos Mecánicos Residuales sobre monitores integrados en el chip PolyMEMS V-INAOE*, IBERCHIP, Bogotá, Colombia, Febrero 2011, 1-4.

F. Quiñones, D. Diaz A. et al, *Micromaquinado Superficial con Polisilicio y su Aplicación en Microestructuras Joule*, IBERCHIP, IBERCHIP 2010 Iguazú Falls, Brazil, February 2010, 23-25

# 5.2. Trabajo Futuro.

Como trabajo futuro se propone:

- Continuar con la medición de las propiedades térmicas de conductividad térmica y el calor específico, utilizando las estructuras propuestas en el diseño del chip PolyMEMS-VII.
- Diseñar y montar el esquema adecuado para medir las propiedades térmicas antes mencionadas.
- Implementar como procedimiento sistemático y periodico la medición del módulo de elasticidad. De ser posible cada vez que concluya la fabricación de una corrida nueva.