



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados
Investigación y Consultoría
Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

*“Diseño y Simulación de Microestructuras Resonadoras
(Cantilevers) para Aplicaciones en Biosensores ”*

Tesis que para obtener el grado de
Doctor en Ingeniería Mecatrónica
presenta

Omar Molina de los Ángeles

Asesora de tesis
Dra. María del Rubí Salazar Amador

Puebla, México.

2014



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

H. Puebla de Z. a 04 de Noviembre de 2014.

A QUIEN CORRESPONDA:

UPAEP

Por este conducto, hago de su conocimiento que después de haber procedido a la revisión rigurosa y detallada de la Tesis denominada **"Diseño y Simulación de Microestructuras Resonadoras (Cantilevers) para Aplicaciones en Biosensores"** que presenta el estudiante **Omar Molina de los Ángeles** con número de matrícula 21200004 e inscrito en el Doctorado en Ingeniería Mecatrónica, como revisor, considero aprobada esta para su impresión.

ATTE.



Dra. Ma. del Rubi Salazar Amador.

Asesor titular de tesis

Agradecimientos personales

A mi madre Concepción de los Ángeles Castro.

A mi asesora Dra. Rubí Salazar Amador.

Agradecimiento especial

A mi hijo Omar Molina Martínez,

a mi esposa María del Carmen Martínez Ríos y

a la Virgen de Juquila.

In memóriam

De mi abuelito Felipe de los Ángeles González

CONTENIDO

	Pág.
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes y justificación	2
1.3 Objetivo de trabajo	5
1.4 Planteamiento Metodológico	6
1.5 Resultados esperados	7
1.6 Contribuciones originales esperadas	7
Bibliografía	8
 Capítulo 2 SENSORES BASADOS EN SISTEMAS MICROMECAÑICOS	
2.1 Introducción	9
2.2 Sistemas Microelectromecánicos	9
2.2.1 El mercado de los microsistemas	10
2.2.2 Integración mecánico - eléctrica	12
2.2.3 Escalado dimensional	13

2.3 Sensores	14
2.3.1 Sensores de masa	17
2.4 Sensores basados en cantilevers de silicio	21
2.4.1 Ventajas del silicio para fabricar microsistemas	23
2.4.2 Propiedades mecánicas de los <i>cantilevers</i>	25
2.4.3 Características de los sensores estáticos	28
2.4.4 Características de los sensores dinámicos	31
2.5 Sensores basados en cantilevers micrométricos re- sonantes con excitación electrostática y detección eléctrica	37
2.6 Detección de la deflexión mediante corriente electroquímica	41
2.7 Resumen del capítulo	41
Bibliografía	42

Capítulo 3 SIMULACIÓN MATHCAD Y COMSOL MULTIPHYSICS

3.1 Simulación MATHCAD	44
3.2 Método de los Elementos Finitos	49
3.3 Simulación COMSOL MULTIPHYSICS del piezocantilever	55
3.4 Resultados y conclusiones	63
Bibliografía	63

Capítulo 4 DISEÑO Y FABRICACIÓN CANTILEVER PIEZOELÉCTRICO ZnO

4.1 Introducción	65
4.1.1. Consideraciones del Equipo	66
4.1.2. Dimensiones del cantilever	67
4.2 Pasos de fabricación del piezocantilever	68
4.2.1. Generalidades	68
Bibliografía	75

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO

1

1.1 Introducción

El estudio profundo del Si cristalino está permitiendo nuevos productos comerciales debido a sus propiedades mecánicas que complementan la óptica de estudio desde el punto de vista electrónico, generando dispositivos micro-electromecánicos.

Las propiedades mecánicas ofrecen entre otras ventajas bajo costo, fabricación por volumen, sensores de alto rendimiento, transductores, etc., para lograr tal objetivo el autor refiere a las siguientes técnicas de proceso de maquinado.

Los grabados químicos para el Si son numerosos, ellos pueden ser isotrópicos o anisotrópicos (dependiendo del dopante) y tienen una variedad de grados de selección para el Si el cual permite determinar la mascarilla apropiada. Tres sistemas de grabado son de particular interés debido a su versatilidad ethylene diamine, pyrocatechol, agua (EDP); KOH y agua; y HF, HNO₃, y CH₃OOH (HNA) . Otro grabado es el SCS, el grabado electromecánico (ECE) que ha sido estudiado mucho tiempo atrás, actualmente no es un grabado muy utilizado debido a que no ofrece ventajas reales con respecto a otros grabados.

Una herramienta relativamente nueva es el grabado láser, cuyas razones de grabado instantáneo son muy altas cuando la intensidad de los láseres es grande y está enfocada sobre una superficie de Si en presencia de algunos gases, el grabado

láser es aplicable únicamente en el proceso de maquinado especial y por lo tanto será extremadamente útil en la realización de estructuras mecánicas complejas de Si .

El proceso epitaxial es también una herramienta importante en el cual en el crecimiento epitaxial se hacen depósitos de películas delgadas donde la orientación del Si cristalino se mantiene estable con respecto al sustrato, una ventaja de este método es que la profundidad del hueco está determinada exclusivamente por el espesor de la capa epitaxial, y este espesor puede ser controlado de manera precisa y medido antes de comenzar el grabado; una limitante de trabajo es el crecimiento de mascarillas a través del Si O₂ : normalmente bajo estas condiciones SCC crecerá epitaxialmente al vacío mientras que el Si policristalino es depositado sobre el óxido, esta mezcla de depósitos han sido utilizados en filtros de audiofrecuencia y circuitos electrónicos.

Por lo tanto se infiere que el uso del Si cristalino de alta pureza como material mecánico ofrece ventajas citadas anteriormente pero también presenta limitaciones (sobre el encapsulado) , esto hace de gran interés el estudio del Si puesto que es el arranque de una nueva era científico-tecnológica que deberá cubrir necesidades de la humanidad.

1.2 Antecedentes y justificación

En la Universidad UPAEP, hasta el momento no se ha realizado ningún trabajo en diseño y simulación de una microestructura resonadora aplicada a biosensores. Ya se han realizado en el Centro de Diseño MEMS (CDM) Proyectos de Investigación tales como micromotores lineales y angulares, cantilevers para

comunicaciones utilizando el siguiente Software Inventor-Algor, COVENTOR y ANSYS, pero como es un excelente área de oportunidades se considera viable.

Cabe destacar que en la Microelectrónica los microelectrónicos con apoyo de biólogos, químicos, etc. desarrollan con gran éxito microestructuras resonadoras con aplicaciones a dispositivos biosensores y como ejemplo de ello tenemos a Centros de Investigación como el CIDS-ICBUAP, CINVESTAV-IPN, INAOE, CCADT-UNAM, FFM-BUAP entre otros, de esta manera complementar estas investigaciones y ver la posibilidad de desarrollar MICROESTRUCTURAS RESONADORAS (CANTILEVERS) nos conduce a la siguiente **hipótesis ¿ Permitirán las microestructuras hacer medidas de altísima exactitud de muestras y de productos bioquímicos biológicos en una concentración baja? .**

La característica principal de biosensores con respecto a los sensores químicos en general es que necesitan ser muy específicos; necesitan poder detectar una molécula específica (un anticuerpo específico por ejemplo) en una concentración muy baja. Esto es necesario por dos razones. En primer lugar, el tiempo de reacción y el costo de la detección se reducen si una muestra más pequeña es necesaria para la detección, y más importantemente, la mayoría de las enfermedades son curables si se descubren en un primero tiempo.

Hasta hace unos cuantos años, ha sido posible explotar eficientemente, las excelentes propiedades mecánicas inherentes a los materiales semiconductores. Los efectos electrónicos en un semiconductor pueden ser provocados introduciéndole señales eléctricas, magnéticas, de radiación, químicos y también mecánicas entre otros.

Para sensar y procesar señales mecánicas, como desplazamiento, velocidad, aceleración, deformación y presión, es necesario el uso de algún

elemento que se deforme o desplace con la acción de la variable a detectar. Con la combinación de técnicas de difusión atómica y grabado de silicio, se pueden obtener dispositivos semiconductores electrónicos micromecánicos sujetos a deformación con la presión.

Biosensor un sistema analítico compuesto por un material biológico inmovilizado (tal como una enzima, anticuerpo, orgánulos célula entera, o combinaciones de los mismos), en íntimo contacto con un sistema transductor adecuado que convierta la señal bioquímica en una señal eléctrica cuantificable, micromaquinado: es una técnica para elaborar estructuras micromecánicas en silicio monocristalino, basada en ataque químico anisotrópico en solución de KOH con agua.

Ésta técnica es perfectamente compatible con los procesos de microelectrónica, particularmente la fabricación en lote, de manera altamente controlable y repetitiva. Con este proceso, se pueden construir estructuras de geometrías regulares en el silicio, para fabricar una gran variedad de sensores micromecánicos; tales como, sensores de presión, de diafragma delgado con principio, piezoresistivos, de condensador u ópticos; sensores de flujo, microresonadores, de deformación tipo trampolín con una o doble suspensión, acelerómetros, etc.

Muchos de ellos, se han reportado pero muchos más se pueden inventar. La producción de sensores de presión semiconductores, por lote, evita tener que ajustar de uno en uno, baja el precio y facilita su fabricación, actualmente esta es la técnica para sensores micromecánicos más empleada e investigada en el mundo. La orientación de los planos del cristal, es importante para determinar la razón de ataque.

1.3 Objetivo de trabajo

- **OBJETIVO GENERAL:** Diseñar y Simular mediante MATHCAD una microestructura resonadora (cantiléver) para medir la variación de su masa. Asimismo simularla en COMSOL Multiphysics para su análisis mecánico y proponer un proceso de fabricación usando técnicas de micromaquinado superficial o en espesor para aplicaciones en Biosensores,.

- **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- I. Condiciones de diseño
- II. Análisis y Simulación del comportamiento mecánico de la microestructura en MATHCAD
- III. Comportamiento mecánico, flexión a la carga estática en COMSOL Multiphysics
- IV. Respuesta en frecuencia, considerando:
 - ✚ Método de transducción Actuador (Eléctrico-Mecánico)
 - ✓ Piezoeléctrico
 - ✓ Electrostático
 - ✚ Método de transducción Sensor (Mecánica –Eléctrico)
 - ✓ Piezoeléctrico
 - ✓ Condensador
 - ✓ Optoelectrónico
 - ✓ Piezorresistivo
- V. Propuesta de aplicación

1.3 Planteamiento Metodológico

- ✚ Condiciones de diseño.
- ✚ Diseñar y realizar análisis en COMSOL Multiphysics del cantilever para ver sus diferentes comportamientos, poniendo énfasis en el mecánico.
- ✚ Excitar el cantilever mediante carga estática para ver el comportamiento mecánico.
- ✚ Analizar el Principio de detección de masa por diferencia de frecuencias.
- ✚ Analizar el resonador mecánico con una frecuencia de resonancia propia y una frecuencia de resonancia diferente cuando se le carga con una masa adicional.
- ✚ Simular la respuesta en frecuencia considerando los siguientes parámetros longitud, ancho, espesor, constante dieléctrica, constante de elasticidad, razón de Poisson, módulo de Young y el número de capas.
- ✚ Simular la respuesta en frecuencia considerando los siguientes métodos:
 - ✓ Transducción Actuador (Eléctrico-Mecánico)
 - ▲ Piezoeléctrico
 - ▲ Electrostático
- ✚ Para detectar la vibración Método de transducción Sensor (Mecánica – Eléctrico)
 - ▲ Piezoeléctrico
 - ▲ Condensador
 - ▲ Optoelectrónico
 - ▲ Piezorresistivo
- ✚ Diseñar y Simular el Proceso de Fabricación utilizando técnicas de micromaquinado superficial o en espesor donde se propone lo siguiente:
 - ▲ Proponer la orientación inicial del substrato para esta microestructura

- ▲ Dar la secuencia de proceso pertinente para lograr la estructura
- ▲ Como detener el proceso de micromaquinado para obtener el espesor deseado
- ▲ Proponer posibles aplicaciones.

1.4 Resultados esperados

- ✚ Que el desplazamiento estático o dinámico, la respuesta a la frecuencia, el transitorio, esfuerzo y la deformación sean los parámetros que determinen el comportamiento mecánico de la microestructura.
- ✚ Que los cambios de frecuencia de resonancia permitan detectar la masa del orden de microgramos o nanogramos a través del resonador mecánico.
- ✚ Que a corto plazo se pueda ver la viabilidad de fabricar y ojalá sirva de base para investigaciones posteriores en esta línea de investigación de tal suerte que contribuya al desarrollo de la medicina.
- ✚ Que se comparen los resultados de la simulación al emplear las técnicas de micro-maquinado y de esta manera determinar cual es la mejor.

1.6 Contribuciones originales esperadas

En el país son muy pocos los grupos investigando al respecto, es una investigación que requiere la participación de diversas profesionistas (mecánicos, biólogos, químicos, microelectrónicas, etc.). Y después de realizar una amplia revisión bibliográfica y de ver la viabilidad, se espera que el producto terminado sea una herramienta para el análisis y caracterización de estructuras fabricadas con tecnologías de microelectrónica aplicables a biosensores.

▪ BIBLIOGRAFÍA

- [1.1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2nd ed. New York: Wiley, 2002.
- [1.2] S. M. Sze, Ed., *VLSI Technology*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [1.3] C. Y. Chang and S. M. Sze, Eds., *ULSI Technology*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [1.4] O. Brand and H. Baltes, "CMOS-based microsensors and packaging," *Sens. Actuators A*, vol. 92, pp. 1–9, 2001.
- [1.5] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proc. IEEE*, vol. 70, pp. 420–457, May 1982.
- [1.6] W. Menz, J. Mohr, and O. Paul, *Microsystems Technology*. New York: Wiley-VCH, 2001.
- [1.7] G. T. A. Kovacs, *Micromachined Transducers Sourcebook*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [1.8] A. Heuberger, *Mikromechnik*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1991.
- [1.9] M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*. Boca Raton, FL: CRC, 1997.
- [1.10] J. Voldman, M. L. Gray, and M. A. Schmidt, "Microfabrication in biology and medicine," *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 1, pp. 401–425, 1999.
- [1.11] D. S. Ballantine, R. M. White, S. J. Martin, A. J. Ricco, G. C. Frye, E. T. Zellers, and H. Wohltjen, *Acoustic Wave Sensors: Theory, Design, and Physico-Chemical Applications*. San Diego, CA: Academic, 1997.
- [1.12] R. R. Tummala, Ed., *Fundamentals of Microsystems Packaging*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [1.13] A. M. Fonseca, J. M. English, M. von Arx, and M. G. Allen, "Wireless micromachined ceramic pressure sensors for high-temperature applications," in *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 11, 2002, pp. 337–343.
- [1.14] CardioMEMS [Online]. Available: <http://www.cardiomems.com/>
- [1.15] ACLARA BioSciences [Online]. Available: <http://www.aclara.com>

SENSORES BASADOS EN SISTEMAS MICROMECÁNICOS

CAPÍTULO

2

2.1 Introducción

Como se expone en el Capítulo 1 de la presente Tesis donde se concluye que: un sensor de masa formado por un sistema microelectromecánico y un sensor biológico con elemento transductor micromecánico. Como introducción al trabajo realizado y con el fin de compararlo con la tendencia científica actual, en este capítulo se presenta el estado del arte de los sistemas microelectromecánicos, haciendo un especial énfasis en los sensores; dado que es un tema muy amplio, se plantea orientado al trabajo desarrollado durante la presente tesis.

2.2 Sistemas MicroElectroMecánicos

Un **Microsistema** o **Sistema MicroElectroMecánico** (MEMS, *Micro-Electro-Mechanical System*) se define como la integración conjunta de sistemas o dispositivos que combinan componentes eléctricos, mecánicos, fluídricos, ópticos y en general de cualquier dominio de la física, los cuales son fabricados utilizando técnicas y procesos compatibles con la fabricación de circuitos integrados, siendo la escala de estos dispositivos desde las décimas de micra hasta los cientos de micra. Los sistemas microelectromecánicos se conocen como MEMS en EE.UU, Tecnología de MicroSistemas, *MST (Microsystems Technology)* en Europa o Micromáquinas (*Micromechatronic*) en Japón. En general se utilizan indistintamente los vocablos de microsistemas y sistemas microelectromecánicos.

Los MEMS integran estructuras muy diversas: cantilevers, membranas, columnas, orificios, motores, etc.. Para fabricar estos componentes se dispone de las técnicas de microelectrónica y el maquinado que en el capítulo 4 se presenta a detalle.

Los microsistemas se dividen en dos grandes grupos: sensores, reaccionan ante un estímulo externo, y actuadores, responden ante un determinado estímulo. En general un microsistema puede estar formado por sensores y actuadores, formando lo que se conoce como sistemas inteligentes o *smart sensors*.

La utilización de sistemas microelectromecánicos, de menores dimensiones y más ligeros, para fabricar sensores, supone una ventaja al aumentar la sensibilidad, reducir el tiempo de respuesta, en ocasiones los MEMS incluyen nuevas funciones, pudiendo además suponer una reducción de costo significativo. Una gran ventaja de fabricar sensores y actuadores que ocupan volúmenes muy pequeños es que pueden crearse laboratorios sobre un chip. De este modo pueden utilizarse en la fabricación de instrumentos de análisis químico, por ejemplo, como dosificadores de medicina o de micromanipulación, por ejemplo, microrobots capaces de manipular células individuales en medios acuosos .

2.2.1 El mercado de los microsistemas

Los microsistemas han resultado ser elementos de gran interés económico. Los microsistemas y su tecnología tienen una serie de cualidades destacables: bajo costo para altos volúmenes de producción, tamaño, peso y consumo de energía pequeños, alta funcionalidad, gran resolución y robustez, además pueden ser biocompatibles. Por todas éstas características se trata de productos de gran interés industrial.

El mercado mundial de microsistemas es un mercado emergente y en continuo crecimiento, en el año 2000 se estimaba en 30 millones de dólares y alcanzó los 60 millones de dólares en el año 2005, según estudio publicado sobre el mercado mundial de los microsistemas. Las principales aplicaciones son:

- La fabricación de periféricos de procesadores y aplicaciones multimedia para tecnologías de la información, donde se pueden destacar las cabezas de lectura de disco duro, así como las cabezas de escritura de las impresoras a chorro de tinta.
- Las aplicaciones biomédicas en sistemas para dosificar medicamentos, de diagnóstico y dispositivos médicos, ejemplos de microsistemas encontramos marcapasos y audífonos.
- En el sector automotriz, principalmente en la gama de sensores: por ejemplo, la incorporación de sensores de presión permite el desarrollo de coches menos contaminantes y más eficientes, uno de los dispositivos clave son los acelerómetros que permiten el despliegue de los airbag.
- Aplicaciones domésticas, se incluyen aplicaciones en electrodomésticos y en la domótica.
- Las telecomunicaciones: tanto en dispositivos de RF (radio y microondas) como en las fibras ópticas se están incorporando cada vez más microsistemas.
- Además existen otros campos de aplicación como pueden ser medio ambiente, industria química, industria alimenticia, procesos y control industrial o en el sector aeroespacial.

MERCADO DE MICROSYSTEMAS POR CAMPOS DE APLICACIÓN

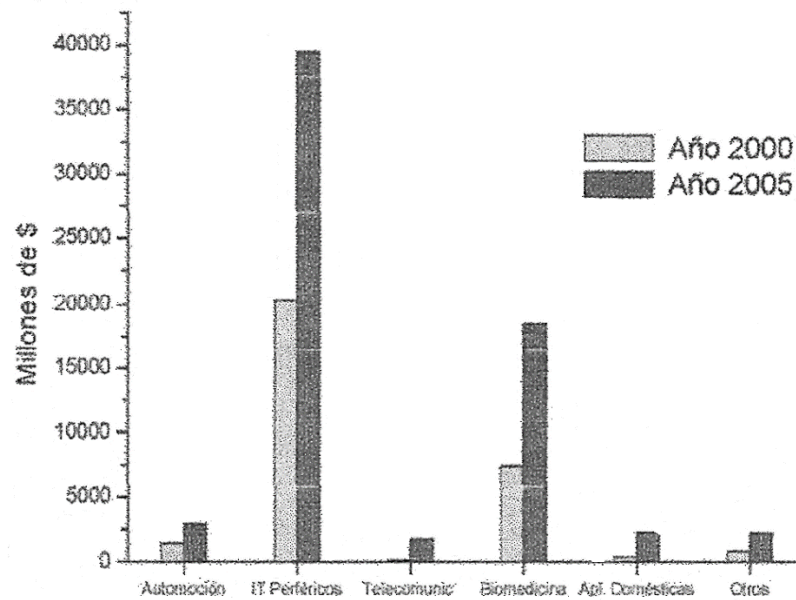


Figura 2.1 Mercado Mundial de Microsistemas en miles de millones de dólares [Nexus-02].

2.2.2 Integración mecánico-eléctrica

La integración de la circuitería junto con las estructuras mecánicas puede mejorar considerablemente el rendimiento de los MEMS. Sin embargo, el proceso de fabricación de circuitos integrados suele ser largo, complejo y costoso, comparándolo con los procesos de fabricación de los microsistemas. Combinar los microsistemas con los circuitos integrados requiere una cuidadosa consideración de la viabilidad, complejidad, fiabilidad, rendimiento y costo de la fabricación. Existen distintas aproximaciones con sus ventajas e inconvenientes para solucionar los problemas de integración.

En los primeros microsistemas y esquemas con tecnologías más simples se fabrican independientemente los módulos correspondientes a los sensores,

actuadores y circuitería. Como última etapa se unen sobre un mismo sustrato y se realizan las conexiones eléctricas mediante soldadura anódica convencional (*wire-bonding*). Este esquema de fabricación de MEMS es lo que se conoce con el nombre de **sistemas multichip o integración mixta**.

Una alternativa es la realización del transductor sobre un sustrato y la circuitería sobre otro, que finalmente son unidos mediante soldadura de uno de los sustratos sobre otro. Es lo que se conoce con el nombre de **flip-chip**, técnica ampliamente utilizada. Por ejemplo, con esta técnica Hagleitner et al. proponen un sistema inteligente compuesto por un triple sensor (masa, capacidad y calorimétrico) para detección de gases. Pogge y colaboradores proponen un método para fabricar MEMS mediante la unión del chip con la circuitería con la estructura mecánica.

2.2.3 Escalado Dimensional

Es necesario conocer como se escalan las diversas magnitudes físicas a medida que se reducen las dimensiones, para entender el funcionamiento de los MEMS. Algunos fenómenos físicos que en el mundo macroscópico son determinantes, al reducir las dimensiones pierden importancia. Por esta razón los sistemas micromecánicos no funcionarían en tamaños macroscópicos. Por ejemplo, los microsistemas apenas están influenciados por la gravedad, de hecho muchas de las estructuras maquinadas colapsarían si se aumentasen las dimensiones por un factor 1000. Ello se debe a que la masa se escala como L^3 (volumen x densidad) siendo L el factor que multiplica las tres dimensiones, mientras que los esfuerzos mecánicos que pueden soportar las estructuras escalan como L^2 (esfuerzo de ruptura x sección). De este modo en los microsistemas la fuerza de soporte de los anclajes es superior a la fuerza de la gravedad y así se evita el colapso de vigas o puentes de dimensiones micrométricas.

Otro ejemplo significativo de como varía la influencia de las fuerzas al reducir las dimensiones del mundo macroscópico al microscópico es en el comportamiento de los fluidos. El comportamiento macroscópico de los sistemas fluídricos no puede hacerse extensivo a nivel microscópico y las ecuaciones que rigen el flujo macroscópico no pueden aplicarse al disminuir las dimensiones. El efecto de escalado afecta también a otras magnitudes, como propiedades térmicas, comportamientos eléctricos y magnéticos.

2.3. Sensores

Según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, un sensor es un *“dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente”*. En términos más técnicos, los sensores son sistemas que perciben una señal de entrada o energía de entrada y la convierten en una señal de salida o energía de salida. Existen diversos tipos de sensores, los que nos interesan son los que permiten medir cualquier magnitud física del mundo real y transformarla en una magnitud eléctrica (generalmente corriente, carga, tensión o impedancia). Los microsistemas tienen una gran variedad de aplicaciones en el desarrollo de sensores para detección de magnitudes de casi cualquier dominio.

Si se clasifican los sensores de acuerdo con la señal de entrada, los distintos tipos de sensores son: mecánicos, térmicos, eléctricos, magnéticos, de radiación, químicos. Otra posible clasificación se refiere a la magnitud de la salida del sensor, en tal caso se habla de sensores de impedancia (donde la magnitud de salida puede ser resistencia o reactancia), de intensidad, de carga o de tensión. En el presente capítulo no se va a realizar un estudio de las diversas clasificaciones puesto que se encuentra ampliamente detallado en distintas referencias.

Algunos ejemplos de sensores basados en MEMS se han mencionado en el apartado anterior. Podemos destacar la utilización de MEMS como sensores de presión, acelerómetros, sensores de temperatura, sensores de flujo, sensores de masa y sensores químicos, bioquímicos y biológicos. Se presentan las características generales y principio de transducción de algunos ejemplos; en detalle, los sensores de masa y sensores químicos (apartados respectivamente).

El origen de la aplicación de la tecnología de silicio para la fabricación de sensores, durante la década de los 50, fue la construcción de **sensores de presión**. Actualmente es el dispositivo más evolucionado en esta tecnología. El mercado de aplicación más importante es el de la industria automotriz. Existen dos tipos de sensores de presión, en función de la técnica de detección utilizada: piezorresistivos o capacitivos. Se trata de medir la deformación de una membrana causada por la variación de la presión, bien colocando piezorresistencias sobre la membrana, bien midiendo la variación de la capacidad. Con sensores maquinados de silicio se puede cubrir el rango de 0 a 34 MPa con precisión del 1%. La figura 2.2 A) muestra un esquema de este sensor, según sea la presión ejercida la membrana se deflejará, la variación de la presión se mide en este caso a partir de la variación de la capacidad entre el electrodo metálico del esquema y la membrana.

Los **acelerómetros** son posiblemente el ejemplo más emblemático de microsistema. El primer acelerómetro de silicio lo realizó Roylance en 1978, su primera aplicación fue en los marcapasos. En los años 80 empezaron a proliferar y actualmente están implantados en la mayoría de los automóviles como activadores de airbag. La parte mecánica de un acelerómetro es la masa sísmica, es decir, una masa muy sensible a cualquier movimiento. En el caso sencillo del sensor la masa sísmica está colgada de una viga en la cual se integra una resistencia cuyo valor cambia con la dirección del movimiento. La figura 2.2 B) muestra un esquema de como son estos dispositivos. Diseños más sofisticados, donde la masa sísmica se cuelga de puentes con dos o más anclajes permiten aumentar la sensibilidad en

una dirección del movimiento. Normalmente se integran dentro de un sistema varios acelerómetros capaces de detectar independientemente varias direcciones de movimiento. Actualmente la mayoría de acelerómetros tienen un sistema de test, de forma que mediante un actuador se comprueba el desplazamiento de la masa en ausencia de aceleración. Diferentes empresas relacionadas con el mundo automotriz han diseñado sus propios acelerómetros, por ejemplo Siemens, Bosch, Analog Devices, etc.

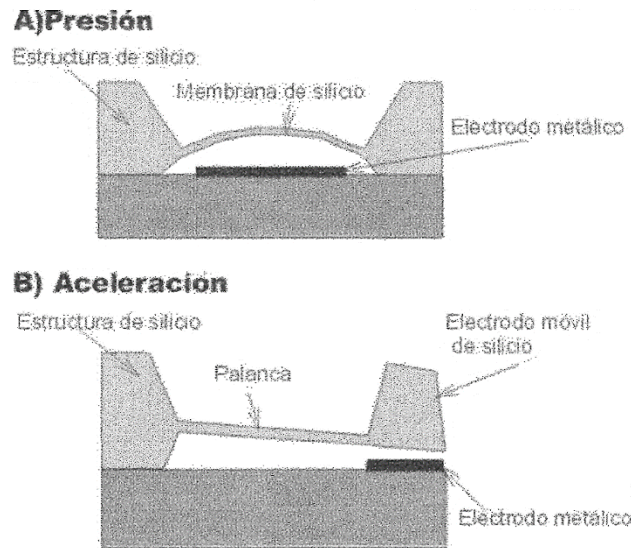


Figura 2.2 Esquema de los transductores A) de un sensor de presión y B) un acelerómetro.

Así como las estructuras para definir los sensores de presión o los acelerómetros se basan generalmente en los mismos principios físicos que se han citado, para la fabricación de **sensores de temperatura** existe una gran variedad de transductores. Puede bastar un elemento integrado en la circuitería que cambie su resistividad con la temperatura. O estar formado el transductor por un sistema resonante complejo.

Los **sensores de flujo** también son de características y fundamentos muy diversos, ya que varían bastante en función del tipo de flujo que se quiera medir. Un caso particular son los sensores de flujo basados en presión diferencial, que miden la presión en un orificio. Existen sensores de flujo, basados en sistemas resonantes. Así mismo algunos sensores miden flujos turbulentos, este tipo de sensores están en general formados por cantilevers.

2.3.1 Sensores de masa

Cada vez son más necesarios sistemas de alta resolución y alta sensibilidad para diagnóstico de enfermedades in vivo, para protección animal en detección de sustancias, etc. Por esta razón los sensores de masa son un tema de actualidad y que está evolucionando constantemente. El sensor más extendido para masas inferiores al nanogramo son las microbalanzas de cuarzo. Su funcionamiento se basa en la alta sensibilidad en masa de las frecuencias de los resonadores de cuarzo y en la precisión de lectura de frecuencia de los circuitos de los resonadores.

Una microbalanza de cuarzo (QCM, *Quartz Crystal Microbalance* o QMB, (*Quartz microbalance*) consiste en un disco de cuarzo con dos electrodos de metal (por ejemplo, oro) sobre el (figura 2.3). La aplicación de un potencial eléctrico externo sobre el material piezoeléctrico le produce tensión mecánica interna. Como el cristal de cuarzo es piezoeléctrico, un campo eléctrico oscilante aplicado a través del material induce una onda acústica que se propaga a través del cristal. Esta onda encuentra un mínimo de impedancia cuando el grosor del sistema es un múltiplo de la mitad de la longitud de onda de la onda acústica. La microbalanza de cuarzo es un sistema en modo cizalla, donde la onda acústica se propaga a través de la superficie. El disco de cristal de cuarzo debe cortarse con una orientación específica respecto a los ejes cristalinos. La deposición de capas delgadas en la superficie del cristal disminuye la frecuencia proporcionalmente a la masa de la capa depositada.

Mediante la detección de la variación en frecuencia se determina la masa depositada.

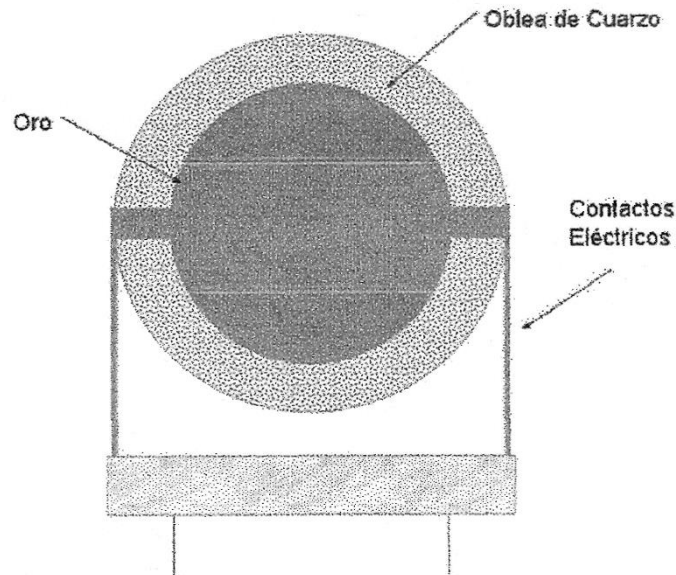


Figura 2.3 Esquema típico de un cristal de cuarzo piezoeléctrico, elemento transductor de las microbalanzas de cuarzo

Las balanzas de cuarzo se utilizan en monitorización de reacciones químicas, en sensores biomédicos, para monitorizar la deposición de metales y en control ambiental. Dispositivos comerciales alcanzan sensibilidad de $0,18 \text{ ag/cm}^2$ a altas frecuencias (10-15 MHz). La resolución total en masa de los sistemas basados en microbalanzas de cristal de cuarzo alcanza valores de masa absoluta de $0,9 \text{ ng/cm}^2$. Estos sistemas en ocasiones permiten realizar medidas electroquímicas en líquido, es lo que se conoce como EQCM (*electrochemical quartz crystal microbalance*).

Existen junto con las microbalanzas de cuarzo otros sistemas para detección de masa basados en MEMS. El estado del arte de estos sistemas evoluciona continuamente por esta razón citaré algunas de las últimas contribuciones.

Sistemas capaces de detectar variaciones de masa de sub-picogramos han aparecido recientemente. Zhang et al. presentan un sistema basado en un micro-oscilador en forma de peine utilizando amplificación de la resonancia paramétrica y con resolución de picogramo en aire. Algunos autores presentan sensores de masa resonantes basados en nanopuentes mediante detección magnética que permiten obtener resoluciones en masa absolutas del orden del atogramo, para excitar la resonancia se aplica un campo magnético perpendicular al puente, de modo que al hacer circular corriente alterna por el se excita, así se genera una fuerza electromotriz, la cual es detectada a través de un analizador de redes. En las últimas contribuciones han diseñado dispositivos capaces de detectar 7 zg, realizando, eso sí, medidas en ultra alto vacío y a una temperatura inferior a los 7° K. Resultados recientes de sensores basados en membranas piezoeléctricas resonantes para detección bioquímica indican que se pueden alcanzar con estos dispositivos resoluciones próximas a los 300 fg/Hz.

La tabla 2.2 resume el estado del arte de los sensores de masa. Indicando los dispositivos existentes comercialmente y en desarrollo científico, las características, una referencia, las técnicas de excitación y detección utilizada, condiciones de medida de presión y temperatura, así mismo se muestra la sensibilidad del dispositivo y la mínima masa que pueden alcanzar, en caso de que haya sido reportada.

Dispositivo	Características	Ref.	Condiciones P & T	Excitación	Detección	Sensibilidad Máxima	Mínima masa reportada
Materiales Piezoeléctricos	Microbalanza de cuarzo	[Qsense]	Condiciones ambiente	Electrostática	Eléctrica	0.18 ng/cm ²	0.9 ng/cm²
	Membranas resonantes	[Nicu-05]	Condiciones ambiente	Electrostática	Eléctrica	0.27 pg/Hz	
Cantilevers resonantes	Precisa AFM	[Sharos-04]	Condiciones ambiente	Mecánica	Óptica	37 fg/Hz	10 pg
	Precisa láser	[Ono-03]	P=10 ⁻⁷ Pa, T constante	Electrostática	Óptica	5 ag	
	Precisa láser	[Lavrik-03]	Condiciones ambiente	Fototérmica	Óptica	5.7x10 ⁻¹⁶ g	5.5 fg
Nanotubos resonantes	Precisa un SEM	[Nishio-05]	P~10 ⁻⁵ Pa T, sin especificar	Piezoeléctrica	SEM	100 zg	150 ag
	Precisa un TEM ²	[Poncharad- 99]	P: vacío. T, sin especificar	Electrostática	Eléctrica		22 fg
Puentes resonantes	Precisa un criostato	[Ekinci-04A]	Ultra alto vacío, T~17°K	Electromagnética	Eléctrica	0.4 ag/Hz	2.5 ag
	Precisa un criostato	[Ekinci-05]	Ultra alto vacío, T<10°K	Electromagnética	Eléctrica	1 zg/Hz	7 zg

Tabla 2.2 Resolución y características de los distintos sistemas para detección de masa., P presión y T temperatura .

(1fg=10⁻¹⁵g, 1 ag=10⁻¹⁸g, 1 zg=10⁻²¹g)

² TEM, microscopio electrónico por transmisión

Las características de la tabla anterior permiten analizar y comparar los diferentes sistemas de detección de masa. Ninguno de estos sistemas es completamente integrable. Destacar que en condiciones ambientales la mínima masa reportada es de 5.5 fg. Modificando las condiciones de medida, es decir al alto vacío (presión menor que 10^{-11} Pa) y baja temperatura se consiguen resoluciones de varios órdenes de magnitud superior (7 zg).

Los sistemas basados en cantilevers tienen muchas aplicaciones como sensores de masa; dado el interés que tienen dentro de la presente tesis, se les dedica un apartado completo más adelante.

2.4 Sensores basados en cantilevers de silicio

Los sensores basados en cantilevers se caracterizan por la gran simplicidad del elemento transductor, que es un o varios cantilevers de dimensiones micrométricas obtenidas a partir del maquinado del silicio. Este tipo de sensores permiten detectar multitud de propiedades físicas y/o químicas: presión, temperatura, aceleración, masa, etc.. Los sensores basados en cantilevers son el transductor ideal para sensores químicos y biológicos, pueden ser usados para reconocimiento molecular, detección de gases, etc.

El funcionamiento se basa en la transducción que produce la magnitud que se quiere medir, en una actuación mecánica del cantilever. Existen dos modos de funcionamiento del cantilever que veremos en detalle en esta sección. El primero de ellos es el modo estático o DC, de forma que la magnitud a detectar produce una deflexión en el cantilever; con el adecuado sistema de lectura se mide la deflexión del cantilever que se relaciona con la magnitud correspondiente. El segundo modo es el dinámico, resonante o AC, el principio de funcionamiento consiste en detectar

cambios en la resonancia debidos a la presencia del mesurando, para ello es necesario excitar el cantilever en su estado resonante y detectar la variación de uno de los parámetros que caracterizan la resonancia (amplitud, frecuencia de resonancia, fase, etc.).

Los sensores basados en microcantilevers tienen su origen y principal impulso en los microscopios de campo próximo (SPM) y microscopios de fuerzas atómicas (AFM).

Estos microscopios basan su funcionamiento en detectar la interacción entre una superficie y la punta del microscopio, suspendida de un *cantilever*.

Baselt et al. utilizan como sensor biológico la punta de un microscopio de fuerzas atómicas, suspendida sobre un *cantilever* micrométrico, que les permite detectar antígenos de 2.0 μm de NdFEBLa, mediante la utilización de anticuerpos recubiertos magnéticamente (equivalente a una fuerza de 11.1 pN).

Desde finales de los 80's, el avance de los microscopios de fuerzas atómicas ha potenciado la microfabricación de cantilevers, se ha propiciado de este modo el desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas para fabricar *cantilevers* micrométricos de silicio.

Dentro de los sensores basados en *cantilevers*, particularizaremos en los sensores basados en *cantilevers* de silicio, las óptimas propiedades mecánicas del silicio, así como el hecho de ser la tecnología base de los circuitos integrados, hacen que sea uno de los materiales más utilizados.

En esta sección se analizan las propiedades del silicio comparadas con otros materiales utilizables como capa estructural, las propiedades mecánicas de los *cantilevers* como elemento transductor, las técnicas de detección estándar tanto

para sensores estáticos como para sensores dinámicos y por último se estudia la influencia de las dimensiones del cantilever en la resolución del sensor.

2.4.1 Ventajas del silicio para fabricar microsistemas

Las excelentes propiedades mecánicas del silicio hacen que sea un material óptimo para ser utilizado como capa estructural de un microsistema. Además al ser el silicio el material base de la tecnología CMOS, facilita la compatibilización con los circuitos electrónicos. De estos datos se deduce que las características del silicio son óptimas para su utilización como capa estructural transductora. En la fabricación de MEMS otros materiales típicos son los vidrios, cuarzo, cerámicas, nitruro y carburo de silicio, metales y otros materiales en casos de aplicaciones específicas.

La tabla 2.3 muestra las propiedades mecánicas del silicio comparadas con otros materiales que también podrían utilizarse como capas estructurales. En concreto se compara con diversos metales, utilizados como capa estructural en diversas aplicaciones. Conviene destacar el alto módulo de Young del silicio próximo al del acero inoxidable. Es importante considerar que algunas propiedades mecánicas de los materiales, varían en función de las dimensiones del mismo, en concreto el módulo de Young de un material puede variar sustancialmente en componentes macroscópicos y microscópicos. Además el método utilizado para la determinación puede influir ligeramente en los resultados. Existen diversos estudios sobre como afecta el módulo de Young a las dimensiones, además se siguen desarrollando nuevos procedimientos para obtener medidas exactas del módulo de Young en estructuras micrométricas.

<i>Propiedad Mecánica</i>	<i>Silicio</i>	<i>Acero Inoxidable</i>	<i>Aluminio</i>	<i>Hierro</i>
Coeficiente de expansión térmica (/°C)	2.33×10^{-6}	17.3×10^{-6}	25×10^{-6}	12×10^{-6}
Densidad (g/cm ³)	2.3	7.9	2.7	7.8
Módulo de Young (GPa)	190	200	70	196
Punto de fluencia (GPa)	70	21	1.7	126
Dureza (Kg/cm ²)	850	660	130	400
Conductividad térmica (W/cm °C)	1.57	0.329	2.36	0.803

Tabla 2.3 Resumen de las propiedades mecánicas del silicio comparadas con distintos materiales conductores [Petersen-82].

El silicio, además de su forma cristalina, se presenta en forma policristalina (polisilicio) y amorfa. El silicio amorfo no tiene ningún tipo de ordenación cristalina y contiene muchos defectos, sus mayores aplicaciones son células solares, fotosensores y pantallas de cristal líquido. Tanto el polisilicio como el silicio amorfo pueden depositarse en capas finas, normalmente inferiores a las cinco micras.

La principal ventaja del polisilicio es que se puede depositar fácilmente sobre diversos sustratos, al ser compatible con la tecnología CMOS se ha utilizado como capa estructural en muchas aplicaciones. El polisilicio tiene un módulo de Young inferior al del silicio, además su valor depende altamente de la técnica de crecimiento de silicio utilizada, del dopaje de la muestra, de las características de la estructura y en ocasiones del método utilizado para calcularlo. Valores entre los 90 y los 160 GPa son los más frecuentes, pero en ocasiones pueden ser aún menores.

El principal inconveniente del polisilicio es la rugosidad de su superficie; debido a su estructura granular, que limita la definición de estructuras de dimensiones en el orden de los centenares de nanómetros.

2.4.2 Propiedades mecánicas de los *cantilevers*

Para analizar las propiedades mecánicas de los *cantilevers*, basta analizar las propiedades mecánicas de un sólido rígido de base rectangular, anclado por uno de sus extremos. Las fuerzas que actúan sobre el *cantilever* son el peso, en caso de estar midiendo, la provocada por la magnitud a detectar y, en caso de tratarse de un *cantilever* resonante, la fuerza de excitación.

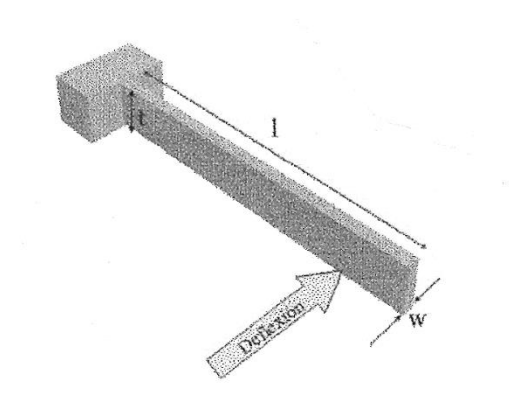


Figura 2.5 Esquema de un *cantilever* con la definición de las dimensiones

La fuerza que provoca la deformación del cantilever es la debida a la elasticidad de la misma. Podemos hacer un análisis detallado de las características mecánicas de un cantilever rectangular. Considerando desplazamientos pequeños del cantilever, de modo que la fuerza no dependa de la posición del extremo del cantilever, la constante elástica viene determinada por:

$$k = 3 \frac{EI}{l^3} \quad (\text{N/m}) \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde E es el módulo de Young del material, I el momento de inercia y l la longitud. Para un cantilever rectangular, el momento de inercia lo determina:

$$I = \frac{t \times w^3}{12} \quad (\text{m}^4) \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Siendo t la anchura paralela al sentido de deflexión y w la perpendicular, tal y como indica la figura 2.5. De acuerdo con 2-1 y 2-2 la constante elástica para un *cantilever* rectangular viene dada por:

$$k = \frac{E}{4} \frac{w^3}{l^3} t \quad (\text{N/m}) \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Podemos destacar del análisis hasta este punto que la geometría del cantilever determina el momento de inercia (I), mientras que las propiedades del material determinan el módulo de Young (E) y la densidad (ρ).

Junto con la constante elástica, el comportamiento mecánico de un cantilever lo determina su respuesta dinámica. El comportamiento dinámico lo fijarán las frecuencias de resonancia de los distintos armónicos, consideraremos la frecuencia de resonancia del primer armónico (f_0) para estudiar el comportamiento dinámico. Consideramos un modelo clásico del cantilever, donde la masa del mismo será una masa distribuida dependiente de la densidad del material que forma el cantilever y el volumen del mismo, esta masa distribuida la denominamos m_d . En el caso general, sobre la palanca podrá haber masas concentradas en un punto, m_c , por simplicidad estas se consideran colocadas en el extremo libre. Si calculamos el modo fundamental de oscilación, para un sistema únicamente con masa distribuida $m_c=0$. La frecuencia de resonancia del modo fundamental se puede expresar como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^4 \times E \times I}{\rho \times A}} \quad (\text{Hz}) \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Donde A es el área de la sección del cantilever y $k=1,875/l$ es un parámetro, dependiente de la longitud del cantilever, obtenido de la resolución clásica de la ecuación de movimiento de los distintos modos de oscilación de un cantilever resonante.

De acuerdo con 2-1 podemos escribir

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{0,24 \times m_d}} \quad (\text{Hz}) \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Podemos definir la masa efectiva m_{ef} como:

$$m_{ef} = m_c + 0,24m_d \quad (\text{g}) \quad \text{Ecuación 2-6}$$

Considerando la contribución de masas concentradas y distribuidas, podemos expresar la frecuencia de resonancia del modo fundamental como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{ef}}} \text{ (Hz)}$$

Ecuación 2-7

Dadas la densidad del material que forma el cantilever (ρ) y de las dimensiones de la misma se puede expresar finalmente la frecuencia de resonancia en función de éstas así:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{w}{l^2}} \text{ (Hz)}$$

Ecuación 2-8

Una vez definidos los parámetros que determinan el comportamiento de los cantilevers, vamos a ver en detalle como influyen en el caso de sensores estáticos y sensores dinámicos.

2.4.3 Características de los sensores estáticos

En el caso de los sensores que trabajan en modo estático o DC la magnitud mensurable provoca una deflexión continua en el cantilever. Existen ejemplos muy diversos de sensores basados en este modo de operación. Si la causa de la deflexión del cantilever se debe a un cambio de temperatura, se tiene un sensor

térmico. En el campo de los sensores químicos y biosensores, al colocar una capa sensible sobre la palanca y sobre esta se adhiere una sustancia, se produce un cambio en la masa y/o un estrés de la superficie que provoca la deflexión estática del microcantilever.

Siendo m la masa del extremo del cantilever y x el desplazamiento del mismo, si la única fuerza que actúa es la fuerza elástica del cantilever, la ecuación en equilibrio del sistema será:

$$\sum F = 0 \Rightarrow kx + m\ddot{x} = 0 \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Donde k es la constante elástica anteriormente definida y $\ddot{x}$, la aceleración. En el caso de que la única aceleración sea la debida a la gravedad, $\ddot{x} = g$, la resolución en masa que se puede alcanzar con este tipo de detección, viene dada por:

$$\frac{\delta m}{\delta x} = \frac{k}{g} \quad (\text{kg/m}) \quad \text{Ecuación 2-10}$$

Para tener alta sensibilidad, conviene tener cantilevers con una constante elástica lo más bajos posibles, por ejemplo si k es de 0,02 N/m, siendo capaces de detectar una variación de la deflexión del cantilever $\delta x = 0,1 \text{ nm}$, la resolución en masa alcanzable es del orden de 10^{-11} g . La constante elástica k según 2-3 depende del módulo de Young del material y de las dimensiones del cantilever, para aumentar la resolución interesa fabricar cantilevers estrechos y largos.

La resolución en la variación de la deflexión dependerá de la técnica de detección utilizada. Existen cuatro métodos más generalizados para la detección estática:

A. Capacitivo. En este método se miden cambios en la capacidad formada por el cantilever y otro electrodo separados por algún material (normalmente aire) debidos a variación de la distancia de separación entre los electrodos cuando el cantilever se mueve. Se trata de un método muy simple que requiere de un diseño muy exacto si se quiere implementar a escala nanométrica, ya que las capacidades parásitas pueden dominar la capacidad dinámica que se quiere medir.

B. Óptico. El sistema de detección consiste en hacer incidir un haz de luz láser sobre el cantilever y detectar la luz reflejada por el cantilever con un fotodetector. Es un método simple, utilizado por la mayoría de los microscopios de fuerzas atómicas. La principal desventaja de este método es la dificultad de integración del sistema y la imposibilidad de utilizarlo con cantilevers en escala nanométrica, por el límite de difracción de la luz. Berger et al. utilizan esta técnica de detección en un biosensor donde la deflexión del *cantilever* la produce la tensión superficial provocada por la anexión de partículas sobre la capa funcionalizada del *cantilever*, el sistema puede servir para detectar reacciones químicas y son capaces de detectar estreses del orden de mN/m.

C. Piezoeléctrico. Se trata de depositar una capa de material piezoeléctrico solidaria con el cantilever y medir el potencial debido al estrés producido. Es un método muy sensible, pero con el inconveniente que supone trabajar con este tipo de materiales que generalmente son contaminantes, es decir, no compatibles con los procesos estándar que se realizan en una sala blanca de procesado CMOS.

D. Piezoresistivo. Se basa en la medida de las variaciones de resistencia que se producen en un material piezoresistivo solidario con el cantilever cuando se somete al estrés producido por la deflexión. Este método es totalmente integrable con la tecnología CMOS gracias a las excelentes propiedades piezoresistivas del silicio y del polisilicio. Por el contrario, es un método de difícil implementación a escala nanométrica a causa de los contactos que hay que realizar sobre el cantilever.

Baselt et al. utilizan este esquema de detección con *cantilevers* utilizados como biosensores, detectan así la presencia de sustancias magnéticas, consiguen detectar concentraciones de 10^{-18} mediante esta técnica han implementado un sensor de vapor de alcohol con un resolución de 10 ppm.

2.4.4 Características de los sensores dinámicos

El principio transductor de los sensores dinámicos se basa en la oscilación inducida externamente en el microcantilever, alcanzando el estado de resonancia. Debido a la acción del mesurando (depósito de masa, cambio de temperatura, etc.) las características de la resonancia cambian, el sensor se basa en la detección de la variación de alguno de los parámetros del sistema resonante (frecuencia de resonancia, amplitud, fase, etc.).

En estos sensores es necesario un sistema de excitación de modo que se fuerce la oscilación del cantilever. Lo ideal es que el sistema permita medir en tiempo real, por ello se suele trabajar en lazo cerrado. La figura 2.6 muestra un diagrama de bloques típico de un sensor resonante. Lógicamente, los sistemas serán más complicados que en el caso de medidas estáticas. Esta mayor complejidad se traduce en una mayor resolución de medida en los sistemas AC.

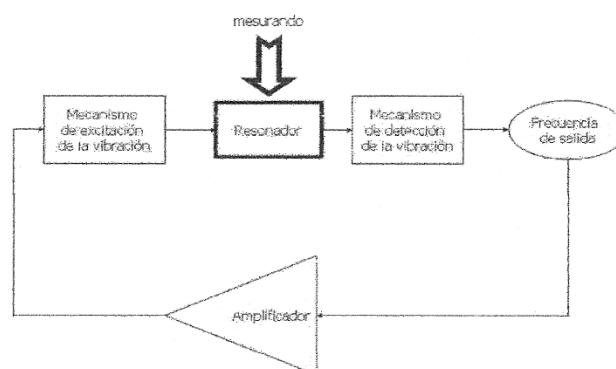


Figura 2.6 Diagrama de bloques de un sensor resonante [Brand-98]

Partiendo de la ecuación 2-7, calculando la variación en masa del cantilever, en función de la variación de la frecuencia de resonancia, la resolución en masa viene dada por:

$$\frac{\delta m}{\delta f} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{k}{f_0^3} = \pi^2 \times \rho \sqrt{E \times \rho} \times l^3 \times t \quad (\text{kg/Hz}) \quad \text{Ecuación 2-11}$$

Suponiendo un cantilever de dimensiones nanométricas con $k = 0,02 \text{ N/m}$ y $f_0 = 1,4 \text{ MHz}$ (de acuerdo con las ecuaciones 2-7 y 2-11) si somos capaces de detectar un cambio en la frecuencia de resonancia de $\delta f = 1 \text{ Hz}$ se pueden obtener sensibilidades del orden de 10^{-19} g considerando masas puntuales depositadas en el extremo del *cantilever*. En este caso también interesa trabajar con constantes elásticas bajas para obtener mayor resolución y frecuencias de resonancias altas.

La resolución alcanzable con los sensores dinámicos es considerablemente mayor (hasta ocho ordenes de magnitud) que en el caso del sensor trabajando en modo estático, para dimensiones similares del cantilever transductor. En general con todos los sensores basados en microsistemas se obtiene mayor resolución si se trata de sistemas resonantes que estáticos.

La frecuencia de resonancia de un sistema se caracteriza por ser el punto de máxima amplitud de oscilación. La magnitud de esta amplitud está limitada por los efectos de amortiguamiento. El amortiguamiento de un sistema se define por su factor de calidad Q , definido como la relación entre la energía almacenada en el sistema E_M y la energía pérdida por ciclo E_C :

$$Q = 2\pi \frac{E_M}{E_C} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

El factor de calidad hace referencia a la disipación de energía mecánica que se produce y depende de diversos factores, como la presión, el anclaje del cantilever y los defectos estructurales, así como del modo de vibración. Un factor de calidad alto indica una resonancia pronunciada, distinguible fácilmente de la oscilación fuera de la resonancia.

Aumentar el pico de la resonancia permite detectar más fácilmente la frecuencia de resonancia de forma que se mejora la resolución del sistema.

El factor de calidad puede calcularse a partir de la respuesta frecuencial de la amplitud de oscilación de un cantilever como:

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta f_{-3dB}} \quad \text{Ecuación 2-13}$$

Donde Δf_{-3dB} es la amplitud del pico de resonancia a -3dB y f_{res} la frecuencia de resonancia anteriormente definida.

La tabla 2.4 muestra, para diversos materiales utilizados en la fabricación de sensores, los valores de los parámetros característicos de un cantilever de dimensiones determinadas (longitud 30 μm , anchura paralela a la oscilación 0,5 μm y grosor 1 μm). A partir del módulo de Young E y la densidad del material se determina la constante elástica, frecuencia de resonancia del primer armónico y resolución en masa considerando masas puntuales depositadas en el extremo. Las excelentes propiedades mecánicas del silicio, seguido del polisilicio, hacen que la resolución en masa sea la más alta. Esta sensibilidad en masa tan alta proviene del alto módulo de Young y de la baja densidad de masa (parámetro E/ρ), aunque la constante elástica no sea de las más bajas, tal y como se observa en la tabla.

Material	E(GPa)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	K(N/m)	f_0 (kHz)	E/δ (m^2/s)	$\delta m/\delta f$ (g/Hz)
Si	190	2,3	0,352	1607,28	$82,61 \times 10^3$	$2,09 \times 10^{-17}$
Poly-Si	160^3	2,3	0,185	743,68	$69,56 \times 10^3$	$2,28 \times 10^{-17}$
Al	70	2,7	0,130	900,42	$25,93 \times 10^3$	$9,00 \times 10^{-17}$
Acero Inoxidable	200	7,9	0,370	889,77	$25,32 \times 10^3$	$2,66 \times 10^{-16}$
Hierro	196	7,8	0,363	886,46	$25,13 \times 10^3$	$2,64 \times 10^{-16}$

Tabla 2.4 Parámetros característicos de una palanca de dimensiones $l=30 \mu\text{m}$, $w=0,5 \mu\text{m}$ y $t=1 \mu\text{m}$ para diferentes tipos de materiales

³ El módulo de Young del polisilicio varía entre 90 y 160 GPa, según las diversas fuentes, $E=160$ GPa es un valor ampliamente reportado.

En el estudio de los sensores resonantes se tienen que considerar tanto las técnicas de detección como las de excitación de los cantilevers. Los métodos más habituales de excitación de los cantilevers son:

- A. **Electromagnética.** La oscilación del cantilever se produce haciendo actuar sobre el un campo magnético, es necesario depositar sobre el cantilever un material magnético sensible al campo aplicado. Esta técnica se utiliza por ejemplo en muchos sistemas formados por puentes obteniendo alta resolución.

- B. **Electrostática.** El estado resonante del cantilever se consigue mediante la aplicación de un campo eléctrico variable entre la palanca y otra estructura denominada *driver*⁴, ésta puede ser el sustrato sobre el que se erige el cantilever, de forma que la vibración es vertical, u otra estructura como un electrodo situado en paralelo al cantilever, consiguiendo una oscilación lateral. Este tipo de excitación puede usarse en aplicaciones para medidas de masa.
- C. **Electrotérmica.** Se coloca una capa de material muy resistivo sobre la superficie del microcantilever, se aplica entre el material y el cantilever una tensión variable, que calienta el material depositado provocando una compresión/expansión de modo que provoca el movimiento deseado sobre el cantilever.
- D. **Optotérmica.** Consiste en calentar el cantilever con una fuente luminosa focalizada con potencia variable en el tiempo.
- E. **Piezoeléctrica.** Al aplicar una tensión alterna sobre un material piezoeléctrico se consigue un movimiento periódico por compresión y expansión del material. Si la frecuencia de resonancia de la señal incidente coincide con la frecuencia de resonancia del sistema, se puede excitar el cantilever a su estado resonante.

Varias de la técnicas de detección para cantilevers resonantes se utilizan también en la detección estática, algunas de ellas tienen un funcionamiento diferente, las más usuales son:

- A. **Capacitiva.** La señal de lectura del transductor es la corriente capacitiva formada por el sistema integrado del cantilever y su electrodo excitador, que podrá ser el sustrato o una estructura paralela al cantilever. Permite la

integración completa sobre un mismo chip de todo el sensor, con altas expectativas de resolución. Mediante excitación electrostática y detección capacitiva se fabrican sensores de masa de alta resolución.

- B. Inductiva.** El cantilever tiene depositado una capa de material conductor por el que pasa una corriente. Debido a la corriente continua y al movimiento oscilatorio del cantilever, se genera un campo magnético que proporciona información sobre el movimiento.
- C. Óptica.** Mediante una fuente de luz coherente (láser) y un fotodetector alineado con la luz reflejada por el cantilever se mide el movimiento de aquella. Ono et al. lo utilizan como técnica de detección en un sensor de masa, utilizando excitación electrostática, consiguen una resolución en masa de 5×10^{-18} g. Pinnaduwege et al. utilizan un sistema de excitación piezoresistiva y detección óptica para medir vapores, consiguiendo una resolución en masa de 70 pg. Ilic et al. aplican esta técnica a la detección de bacterias de *Escherichia Coli*, obteniendo una resolución en masa de 15 pg (en vacío).
- D. Piezoresistiva.** El movimiento del cantilever se detecta a través del material piezoeléctrico depositado en el anclaje del cantilever, el material se ha depositado en esta zona ya que es donde hay más sensibilidad. El material piezoeléctrico se deforma como consecuencia del movimiento del cantilever y proporciona una señal eléctrica proporcional a este movimiento. Una aplicación de este tipo utilizan Burg et al. para detección molecular, utilizando *cantilevers* con microcanales de forma que la presencia de sustancias en el líquido dentro del *cantilever* provoca variaciones, alcanzando resoluciones de $1,4 \times 10^{-17}$ g/ μm^2 .

- E. Piezoeléctrica.** Este esquema de detección es muy parecido a la lectura piezoresistiva, se mide la variación de tensión del material piezoeléctrico que se mueve solidariamente con el cantilever.

La integración conjunta de sistemas compuestos por *cantilevers* estáticos y resonantes también es posible y así se desarrollan sistemas complementarios. Si se integran diversos sensores similares de forma que se tengan diversas medidas se consiguen sistemas más confiables.

2.5 Sensores basados en cantilevers micrométricos resonantes con excitación electrostática y detección eléctrica

El sensor de masa formado por un cantilever de silicio cristalino utilizando sustratos SOI se diseña un biosensor formado por un cantilever resonante de dimensiones submicrométricas. Para aumentar la resolución del sensor según las ecuaciones 2-3, 2-8 y 2-11 interesa aumentar la frecuencia de resonancia y disminuir la constante elástica. Esto se traduce en la reducción de las dimensiones. Por otro lado existirá una limitación importante respecto a la frecuencia de resonancia máxima que será la que permita leer el circuito.

La tabla 2.5 muestra la sensibilidad alcanzable para el caso de cantilevers de silicio de distintas dimensiones. Se pretende diseñar estructuras submicrométricas y nanométricas con el objetivo de tener resoluciones en masa del orden de ag/Hz . Se escogen las dimensiones de tal manera que la frecuencia de resonancia sea inferior a 1.5 MHz. En general la limitación de la frecuencia de resonancia vendrá determinada por el sistema de medida; para la aplicación que se desarrolla, el ancho de banda del circuito es el que limita y es próximo a 1.5 MHz. La tabla muestra la resolución alcanzable por un cantilever como los usados en los microscopios de fuerzas atómicas (micro) y en el caso de reducción de dimensiones

alcanzando rango nanométrico, suponiendo una masa puntual depositada en el extremo. En el caso submicrométrico se considera que la masa se deposite uniformemente sobre toda la palanca.

<i>Tipo de cantilever</i>	<i>$l(\mu\text{m})$</i>	<i>$w(\mu\text{m})$</i>	<i>$t(\mu\text{m})$</i>	<i>$k(\text{N/m})$</i>	<i>$f_0 (\text{Hz})$</i>	<i>Sensibilidad (g/Hz)</i>
<i>Micro:masa puntual</i>	125	30	4	44	364 k	$4,9 \times 10^{-14}$
<i>Sub-micro:masa puntual</i>	30	0,8	0,6	0,45	1,1 M	14×10^{-18}
<i>Sub-micro:masa uniforme</i>	30	0,8	0,6	0,45	1,1 M	56×10^{-18}
<i>Nano: masa puntual</i>	10	0,1	0,5	0,02	1,3 M	$4,0 \times 10^{-19}$

Tabla 2.5 Sensibilidad alcanzable por sensores formados por cantilevers de silicio de distintas dimensiones

Conviene destacar que el objetivo es reducir la mínima masa detectable. En general lo que interesa es detectar el mínimo de masa posible y esto se consigue depositando una masa puntual en el extremo libre de la palanca. Disminuyendo las dimensiones en el rango nanométrico se consigue incrementar la sensibilidad sin aumentar la frecuencia de resonancia.

Las ventajas de este sensor presentado frente a todos los vistos en apartados anteriores, es que se consigue un sensor integrado con alta resolución para medidas en aire (ninguno de los disponibles tiene estas características).

La circuitería CMOS integrada monolíticamente permite la detección y amplificación de la corriente capacitiva generada por la interficie *driver*-cantilever. El diseño de la circuitería se ha realizado por Jaume Verd, del grupo de investigación ECAS, por esta razón no se trata en detalle.

La elección del sistema de detección se hizo al comienzo del proyecto Nanomass. Debido a las características del sistema, se quiere alcanzar una resolución del orden de los ag/Hz , así los cantilevers serán de anchuras (w) nanométricas, la anchura mínima será de 100nm . Con sistemas de detección ópticos sería muy difícil conseguir focalizar un spot de luz láser sobre una estructura tan pequeña, ya que la longitud de onda del láser es de unos 512 nm y $\lambda/2=206\text{ nm}$, es el diámetro del spot mínimo que se puede obtener, por otro lado, depositar sobre la palanca de tales dimensiones materiales piezoresistivos, piezoeléctricos o magnéticos complicaría los procesos de funcionalización de la superficie, por ello se descartó la posibilidad de utilizar estos métodos. Además se pretende hacer un sistema completamente integrable, de forma que los sistemas magnéticos y ópticos quedan también descartados, por el requerimiento de un montaje complejo de medida.

La excitación del cantilever se realiza electrostáticamente mediante la aplicación de una tensión AC (V_{AC}) entre el *driver* y el cantilever, tal y como muestra el esquema de la figura 2.7. También se aplica una tensión continua (V_{DC}) que permite detectar el movimiento del cantilever. El circuito de lectura puede conectarse al *driver* o al *cantilever*, la excitación se hará siempre por el electrodo no conectado al circuito.

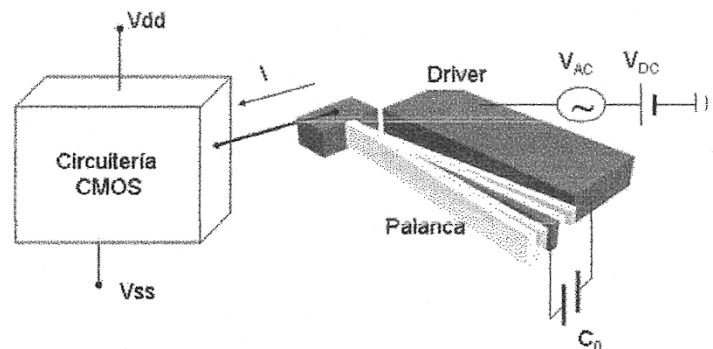


Figura 2.7 Esquema del sistema de excitación electrostática conectado con la circuitaría CMOS de detección para amplificar la corriente capacitiva

La corriente capacitiva es una medida de la amplitud de oscilación del cantilever y por tanto proporciona la respuesta frecuencial de la misma. Se puede calcular a partir de la variación de la corriente, vendrá dada por la variación de la capacidad (C) entre el cantilever y el *driver*, y la tensión aplicada (V):

$$I_c(t) = \frac{\partial}{\partial t}(C \times V) = (C_0 + c) \frac{\partial V_{AC}}{\partial t} + (V_{DC} + V_{AC}) \frac{\partial c}{\partial t} \approx C_0 \frac{\partial V_{AC}}{\partial t} + V_{DC} \frac{\partial c}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

14

La capacidad C, tiene una componente estática C_0 y una componente variable en el tiempo c , que refleja las variaciones de la capacidad debidas al movimiento del cantilever. Se asume que las variaciones de c son pequeñas en comparación con C_0 y que la tensión V_{AC} variable es mucho menor que la tensión continua V_{DC} . El primer término de la ecuación 2-14 corresponde a una corriente (I_p) no deseada, ya que no información alguna relativa al movimiento del cantilever. El segundo término refleja la oscilación del cantilever pues depende de las variaciones de capacidad debidas al desplazamiento del cantilever, este término se denomina corriente de desplazamiento (I_D).

La detección del movimiento de la palanca se reduce a detectar corriente de baja magnitud y frecuencia relativamente elevada, de forma que el diseño del sistema de detección es bastante complejo. Debido a que las variaciones de capacidad son muy pequeñas y que la capacidad estática también es muy pequeña, en el rango de los 10^{-15} Faradios, para evitar capacidades parásitas es preciso integrar monolíticamente el transductor con la circuitería. Se utiliza la tecnología CMOS CNM25 2P 2M, tecnología de $2.5 \mu\text{m}$ con dos niveles de polisilicio y 2 niveles de metal.

2.6 Detección de la deflexión mediante corriente electroquímica

Como una de las posibilidades de obtener un sensor químico, bioquímico o biológico (dependerá de la funcionalidad de la superficie) capaz de operar en medio líquido, dado que es el medio biológico natural.

La superficie del cantilever está funcionalizada, de modo que permite que sólo las sustancias que se quieran detectar se adhieran a la superficie de la misma. La deflexión del cantilever se producirá por el incremento de masa o por estrés superficial debido a la adhesión de partículas.

2.7 Resumen del capítulo

En este capítulo se ha presentado el estado del arte de los sensores basados en sistemas microelectromecánicos, haciendo énfasis especial en los sistemas basados en cantilevers resonantes de silicio como sensores de masa y sensores químicos. Se ha demostrado que los sensores resonantes desarrollados durante la presente tesis presentan características distintas a las existentes en el mercado, en particular porque se trata de sistemas integrados en chip. Con las características de los sensores que se fabrican durante la presente tesis, se espera que en condiciones ambientales permitirán alcanzar mayor resolución que el resto de sistemas reportados. La segunda aproximación (sensores químicos o biológicos) aporta un sistema sencillo que permite trabajar en medio líquido.

▪ BIBLIOGRAFÍA

- [2.1]. S. Rast, C. Wattinger, U. Gysin, E. Meyer "Dynamics of damped cantilevers" *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 2772 (2000).
- [2.2]. L. Landau, E. Lifshitz "Theory of Elasticity" Ed. Pergamon, Oxford, (1986).
- [2.3]. H. Chena, S. Mukherjeea, N. Alurub "Charge distribution on thin semiconducting silicon nanowires" *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **197**, 3366 (2008).
- [2.4]. Z. P. Bazant, L. Cedolin "Stability of structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories" Dover Publications, Dover (2003).
- [2.5]. Y. Zhang, Y. – P. Zhao "Applicability range of Stoney's formula and modified formulas for a film/substrate bilayer" *J. Appl. Phys.* **99**, 053513 (2006).
- [2.6]. Ch. – H. Hsueh "Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending" *J. Appl. Phys.* **91**, 9652 (2002).
- [2.7]. J. E. Sader "Surface stress induced deflections of cantilever plates with applications to the atomic force microscope: Rectangular plates" *J. Appl. Phys.* **89**, 2911 (2001).
- [2.8]. Y. Yang, Q. Ren, Y. – P. Zhao "Modelling analysis of surface stress on a rectangular cantilever beam" *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, 2140 (2004).
- [2.9]. R. W. Clough, J. Penzien "Dynamics of Structures" Ed. McGraw–Hill, New York (1975).
- [2.10]. J. E. Sader "Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope" *J. Appl. Phys.* **84**, 64 (1998).
- [2.11]. J. E. Sader, S. P. Jarvis "Coupling of conservative and dissipative forces in frequency-modulation atomic force microscopy" *Phys. Rev. B* **74**, 195424 (2006).
- [2.12]. O. Arcizet, P. – F. Cohadon, T. Briant, M. Pinard, A. Heidmann "Radiation-pressure cooling and optomechanical instability of a micromirror" *Nature (London)* **444**, 71 (2006).
- [2.13]. J. Tamayo "Study of the noise of micromechanical oscillators under quality factor enhancement via driving force control" *J. Appl. Phys.* **97**, 044903 (2005).
- [2.14]. F. R. Blom, S. Bouwstra, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman "Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry" *J. Vac. Sci. Technol.* **10**, 38 (1992).
- [2.15]. J. W. Rayleigh "The theory of sound" Ed. Dover, New York (1945).
- [2.16]. D. Sarid "Scanning Force Microscopy" Ed. Oxford University Press (1994).
- [2.17]. J. E. Sader, J. W. M. Chon, P. Mulvaney "Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers" *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 3967 (1999).
- [2.18]. J. E. Sader, I. Larson, P. Mulvaney, L. R. White "Method for the calibration of atomic force microscope cantilevers" *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 3789

- (1995).
- [2.19]. A. N. Cleland, M. L. Roukes "Noise processes in nanomechanical resonators" J. Appl. Phys. **92**, 2758 (2002).
 - [2.20]. P. Mohanty "Quantum nanomechanics" arXiv:0802.4116.
 - [2.21]. M. Poggio, C. L. Degen, H. J. Mamin, D. Rugar "Feedback Cooling of a Cantilever's Fundamental Mode below 5 mK" Phys. Rev. Lett. **99**, 017201 (2007).
 - [2.22]. F. Marquardt, J. P. Chen, A. A. Clerk, S. M. Girvin "Quantum Theory of Cavity-Assisted Sideband Cooling of Mechanical Motion" Phys. Rev. Lett. **99**, 093902 (2007).
 - [2.23]. A. N. Cleland "Thermomechanical noise limits on parametric sensing with nanomechanical resonators" New J. Phys. **7**, 235 (2005).
 - [2.24]. K. L. Ekinci, M. L. Roukes "Nanoelectromechanical systems" Rev. Sci. Instrum. **76**, 061101 (2005).
 - [2.25]. K. L. Ekinci, X. M. H. Huang, M. L. Roukes "Ultrasensitive nanoelectromechanical mass detection" Appl. Phys. Lett. **84**, 4469 (2004).
 - [2.26]. T. R. Alberche, P. Grütter, D. Horne, D. Rugar "Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity" J. Appl. Phys. **69**, 668 (1991)
 - [2.27]. W.P. Robins "Phase Noise in Signal Sources" IEE Telecommunications Series 9, edited by J. E. Flood and C. J. Hughes, Ed. Peregrinus, London (1982).

SIMULACIÓN MATHCAD Y COMSOL MULTIPHYSICS

CAPÍTULO

3

Para lograr nuestro objetivo de medir masa del orden de microgramos se procedió de la siguiente manera: inicialmente se eligen los materiales maquinables posibles, estos se citarán a continuación uno por uno concluyendo que el Si y Polisilicio son los más amigables de acuerdo a los resultados obtenidos, además cada uno de ellos también presenta resultados esperados.

3.1 Simulación MATHCAD

Se analiza cada medición de los respectivos materiales considerando su módulo de Young, un barrido a lo largo del cantilever desde 345 μm hasta 1345 μm con incrementos de 100 μm , ancho 100 μm y espesores para el sustrato de Si es de 300 μm , la capa de sacrificio de Si es de 15 μm , el piezoeléctrico ZnO 0.2 nm y para el contacto de Al la capa es de 0.5 μm , cabe destacar que se consideran dentro de sus propiedades mecánicas sus densidades y razones de Poisson.

La fórmula para encontrar la frecuencia de resonancia natural es:

$$f_1(l) := 0.1604 \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu^2)}{\rho}} \cdot \frac{h}{l^2} \quad (1)$$

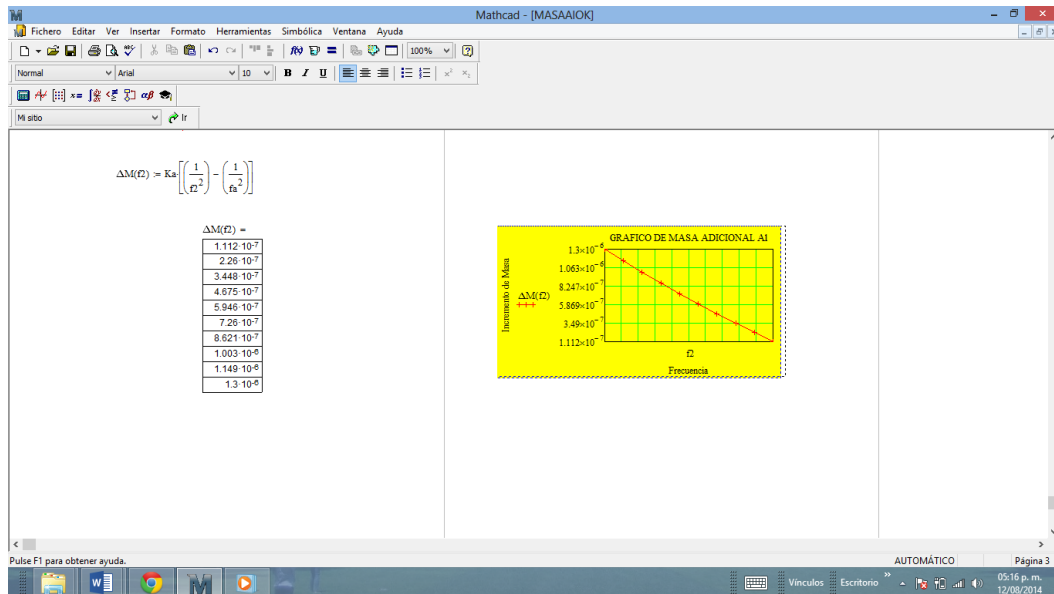
Donde $f_1(l)$ es la frecuencia de resonancia natural, E es el módulo de Young, ρ la densidad, ν la razón de Poisson, l largo del cantilever y h el espesor.

Una vez realizado este análisis la variación de la masa se encuentra a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta M(f_2) := K_a \cdot \left[\left(\frac{1}{f_2^2} \right) - \left(\frac{1}{f_a^2} \right) \right] \quad (2)$$

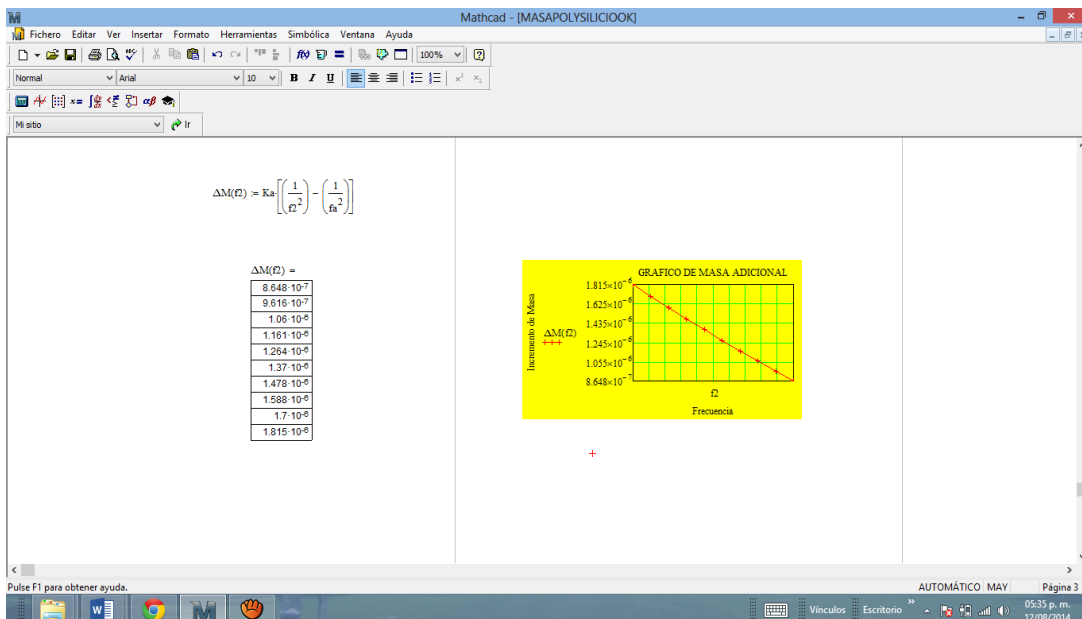
En consecuencia se obtuvieron los siguientes resultados para los siguientes materiales maquinables de forma individual:

1. Material Al



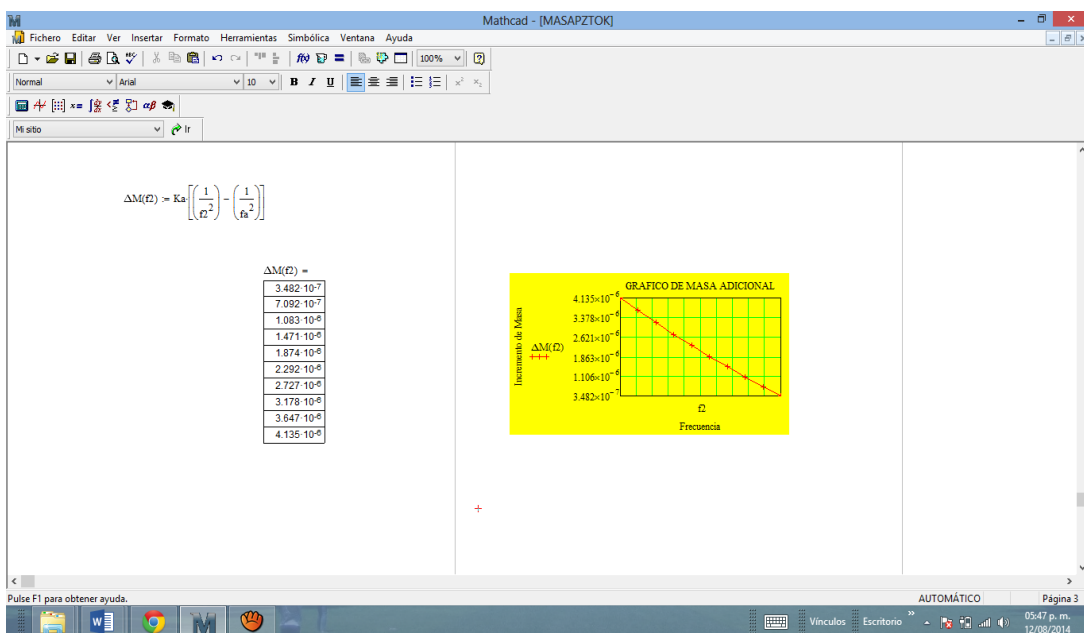
Se puede apreciar que se puede medir hasta microgramos lo cual es lo que se esperaba.

2. Material Polysilicio

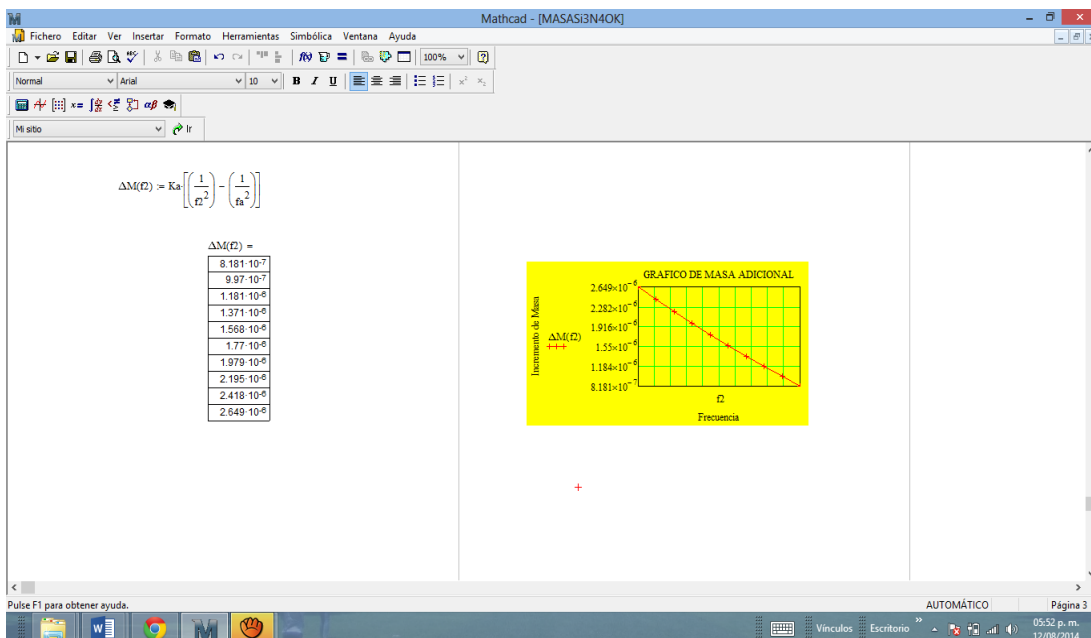


Comparando este material con el anterior se observa que los resultados caen dentro del rango esperado.

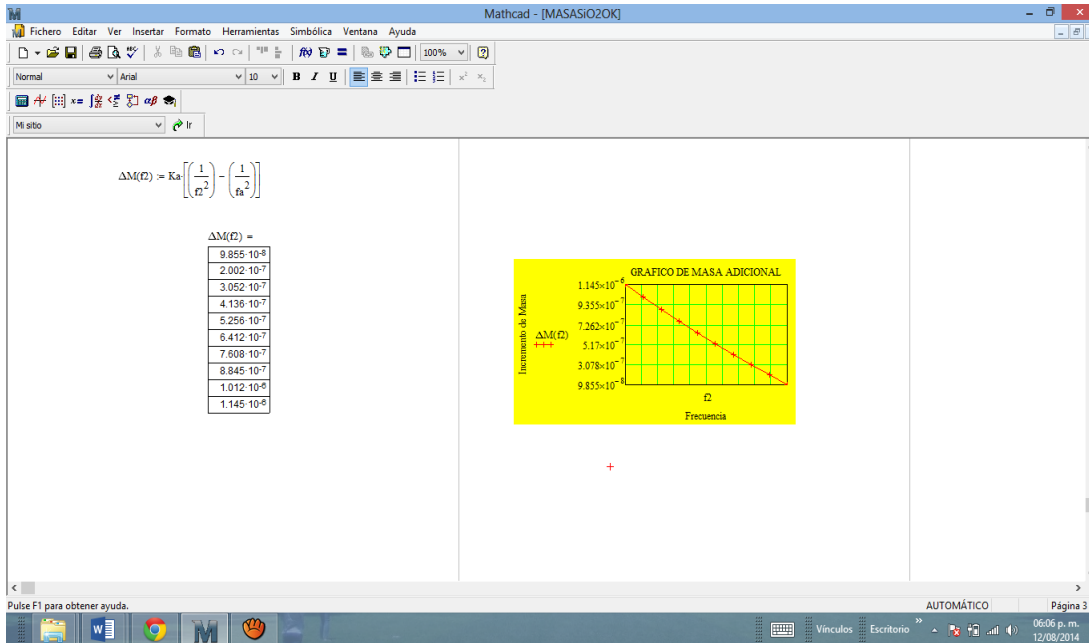
3. Material PZT (piezoeléctrico)



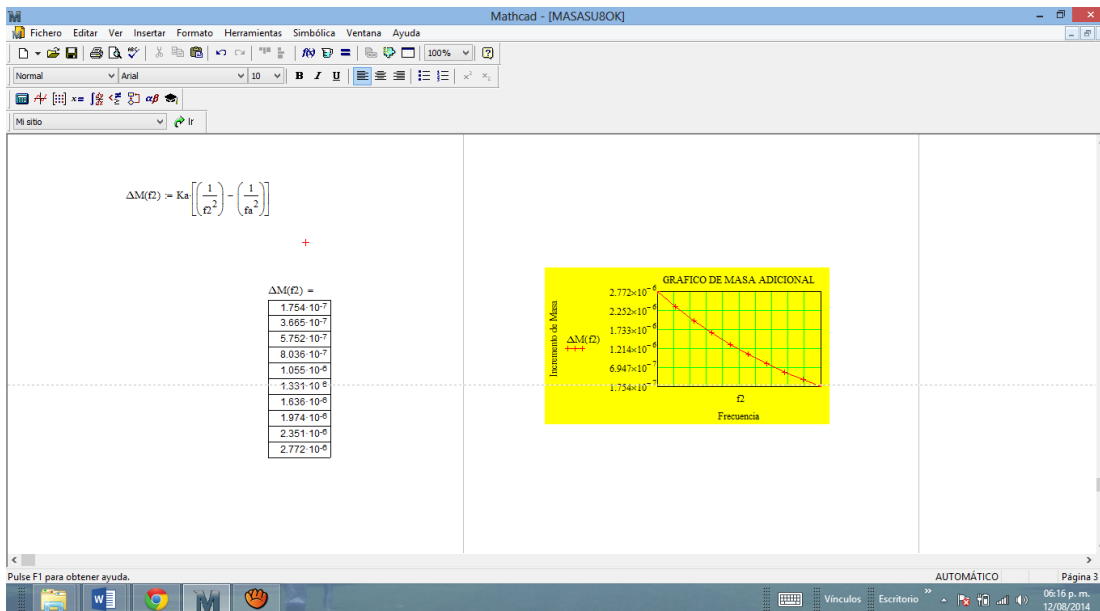
4. Material Si₃N₄ (Nitruro de Silicio)



5. SiO₂ (Dióxido de Silicio)



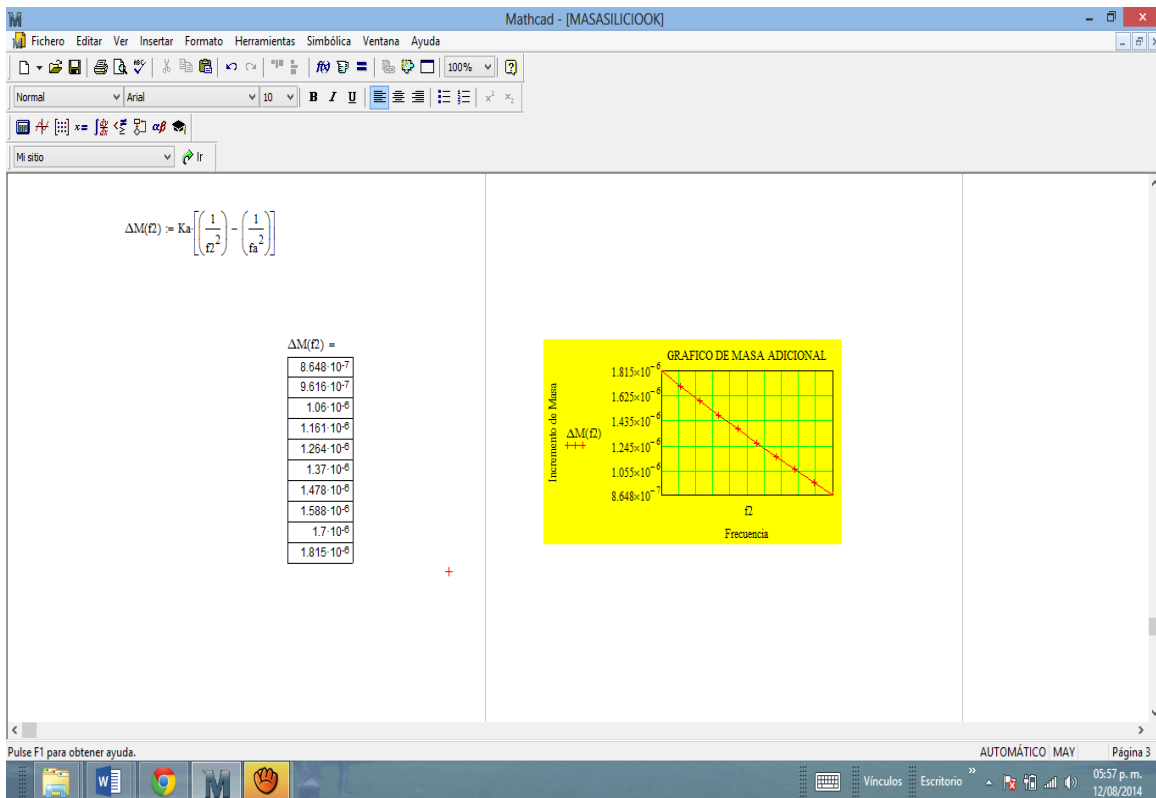
6. SU8



Una vez realizado el análisis para el sustrato de Si se hizo el análisis para el piezocantilever considerando todas sus capas evidentemente se ve alterada su

frecuencia de resonancia natural razón por la cual presenta una frecuencia de resonancia excitada y precisamente debido a esta frecuencia se hace el siguiente barrido $f2:=1.422E4, 1.412E4..1.326E4$ y como $f1(l):=1.522E4$ se puede observar que la diferencia entre ambas frecuencias es de 100 Hz, donde $f2$ es la frecuencia de resonancia excitada. En seguida se muestra la variación de masa del piezocantilever y se puede observar que al compararla con los materiales micromaquinables presenta resultados esperados.

7. Microestructura con todas las capas



3.2 Método de los Elementos Finitos

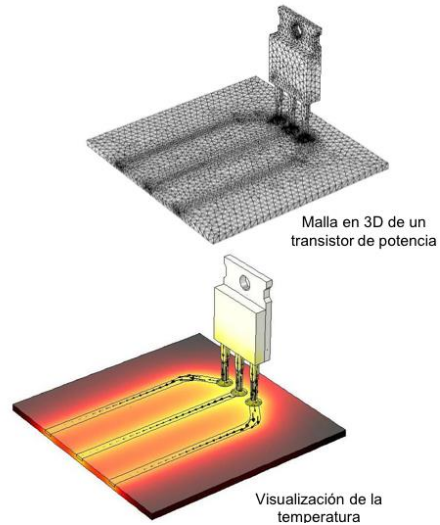
El Método de los Elementos Finitos (**MEF**) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de Ingeniería y Física. El MEF permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos.



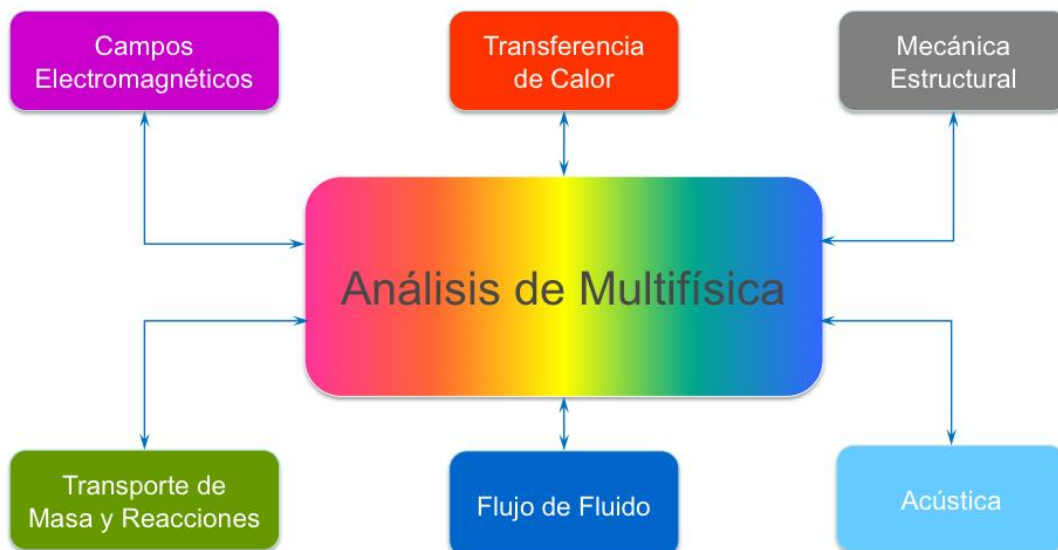
Existen programas de software comercial para resolver problemas utilizando el MEF entre ellos se encuentran: Comsol Multiphysics, Abaqus, Flux, Staad.pro, Catia v5, Cype, Dlubal RFEM, Sap2000, Algor, HKS/Abaqus/Simulia, ANSYS, CAELinux, Elmer, FEAP, Phase2 entre otros.

- He aquí algunas de las características principales del Software COMSOL Multiphysics:

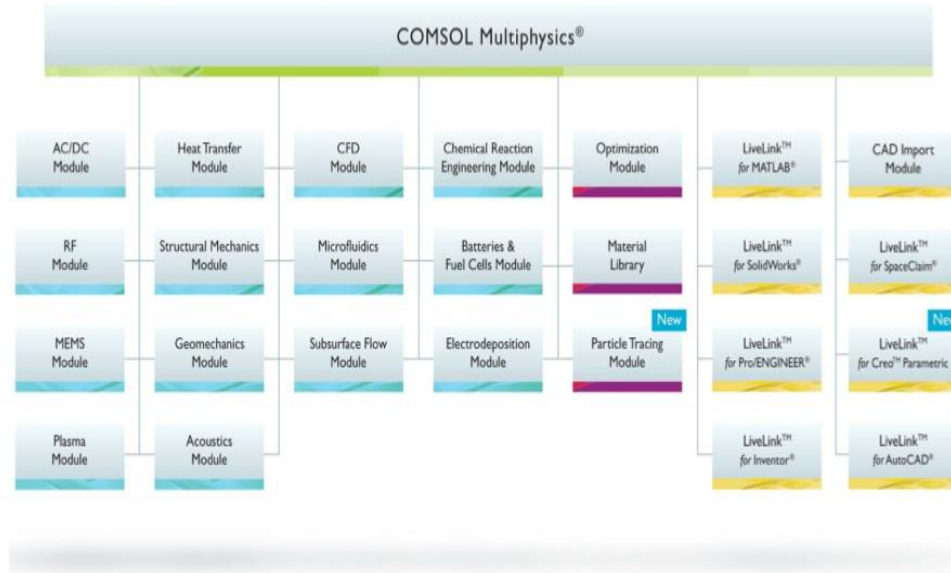
- Análisis con elementos finitos
- Multifísica sin limite
- Flexible y amigable
- Librerías de materiales
- Herramientas matemáticas
- Completamente paramétrico



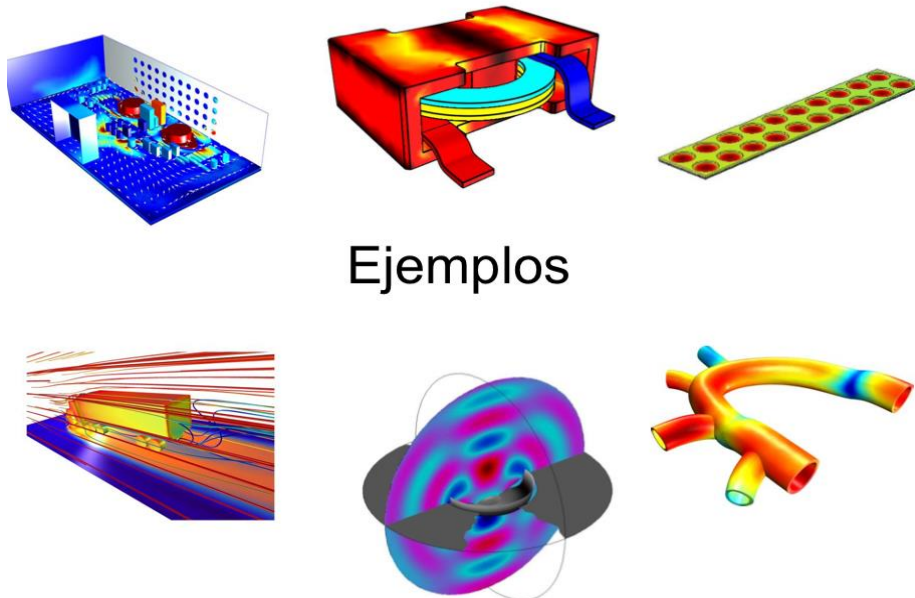
- Para la realización de un análisis se puede resumir a bloques lo siguiente:



- Los módulos se pueden representar de la siguiente manera:



- ✓ A continuación se muestran algunos ejemplos interesantes de varias áreas:



Ejemplos

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

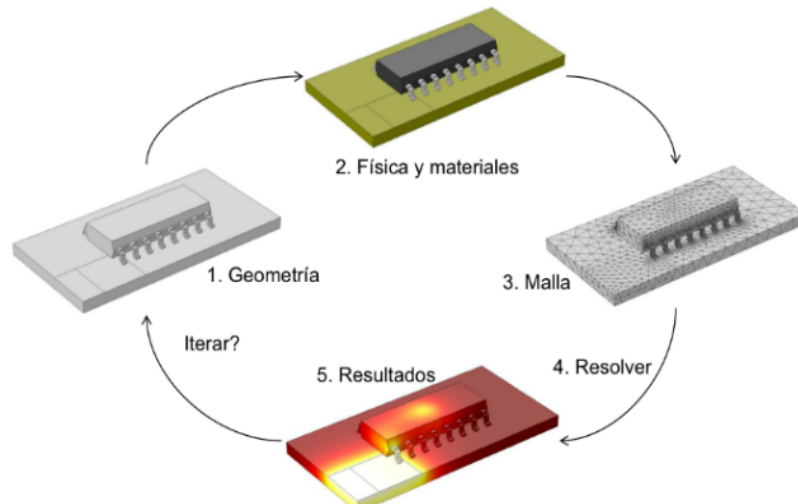
Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

Preproceso, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y pre condicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

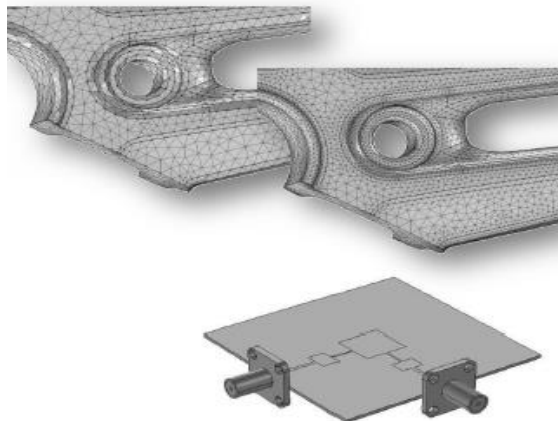
Cálculo, el resultado del pre proceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

Postproceso, el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

- ✓ En consecuencia el proceso de simulación es muy amigable y este está representado en el siguiente esquema:



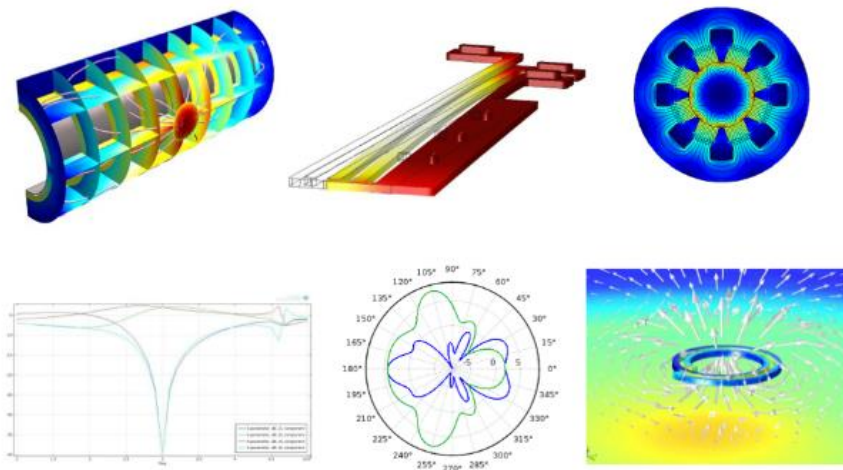
Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodos”. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama “malla”, es precisamente este uno de los aspectos más interesantes para el análisis de cualquier tipo de diseño:



Algunos tipos de análisis ingenieriles comunes que usan el método de los elementos finitos son:

- a) **Análisis estático** se emplea cuando la estructura está sometida a acciones estáticas, es decir, no dependientes del tiempo.
- b) **Análisis vibracional** es usado para analizar la estructura sometida a vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estas acciones puede actuar en la frecuencia natural de la estructura y causar resonancia y consecuentemente un fallo.
- c) **Análisis de fatiga** ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura, prediciendo el efecto de los ciclos de carga sobre el espécimen. Este análisis puede mostrar las áreas donde es más probable que se presente una grieta. El análisis por fatiga puede también predecir la tolerancia al fallo del material. [12]

Una vez concluido el enmallado se procede a la simulación donde se podría apreciar lo siguiente:



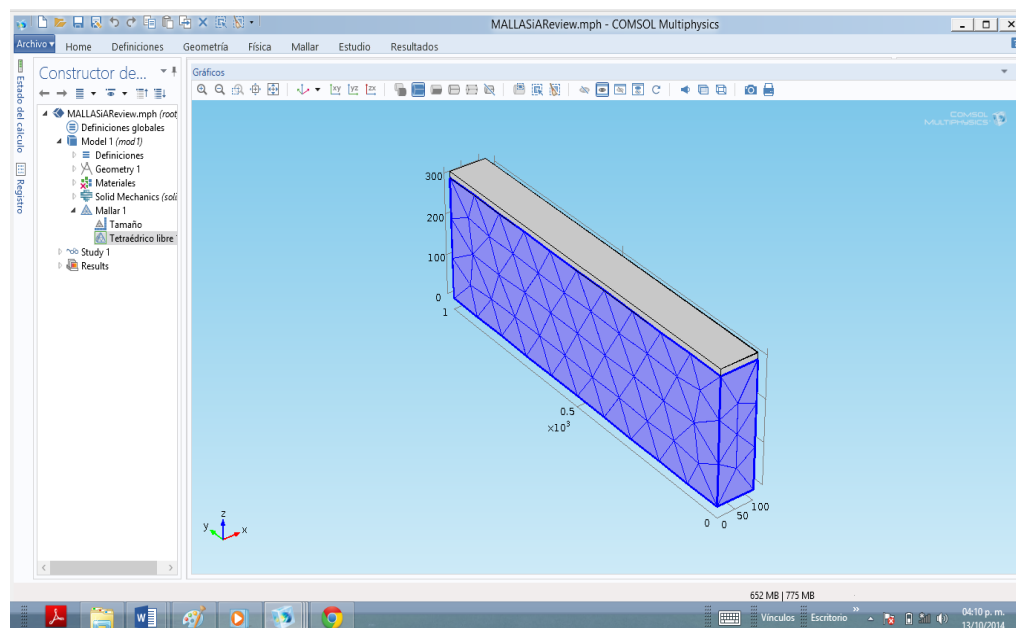
- ✓ Ejemplo multifísico en vivo de un fusible de automóvil:



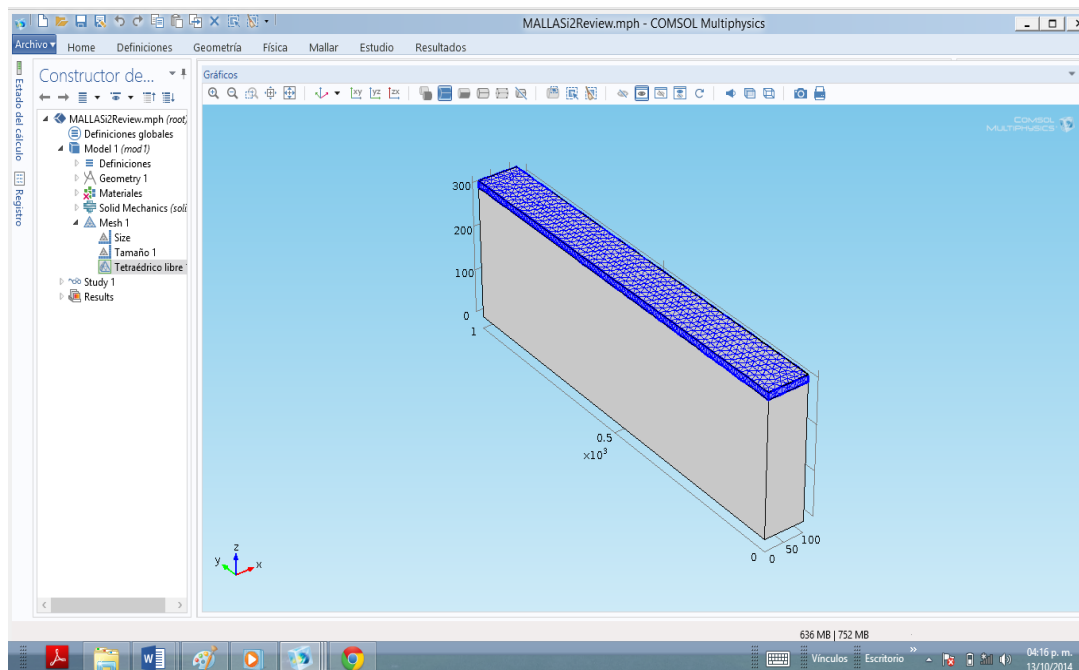
3.3 Simulación COMSOL MULTIPHYSICS del piezocantilever

A continuación se utilizó esta herramienta para el piezocantilever diseñado y simulado en MATHCAD y una vez especificada la geometría y los materiales se obtuvo el siguiente mallado para cada una de las capas de la microestructura:

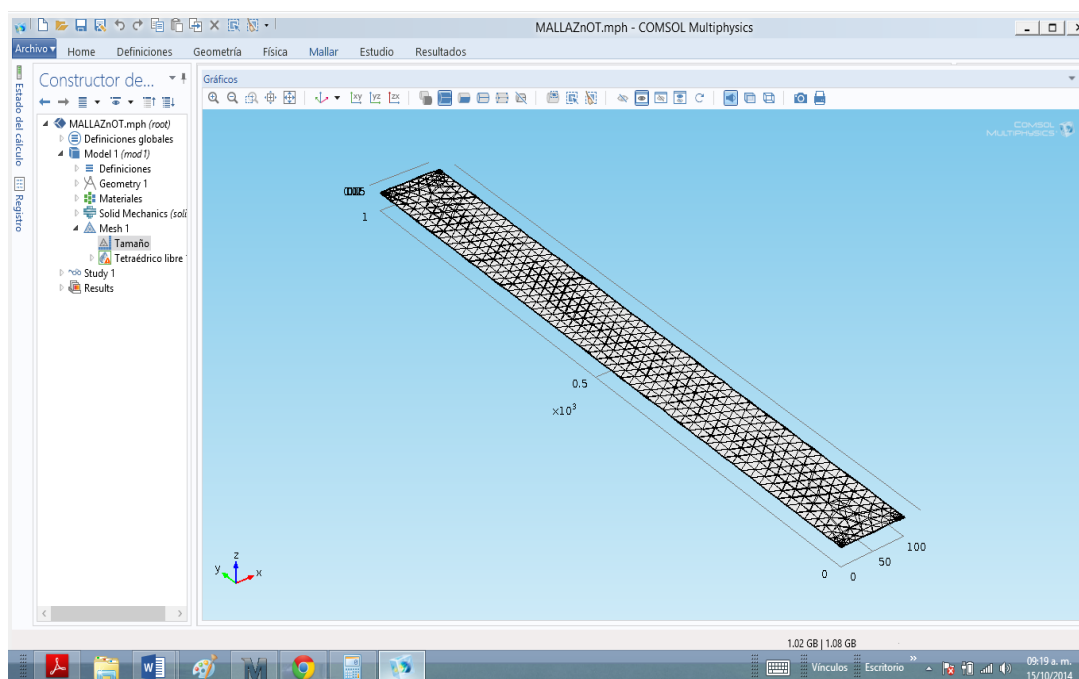
- I. Malla para el sustrato de Si :



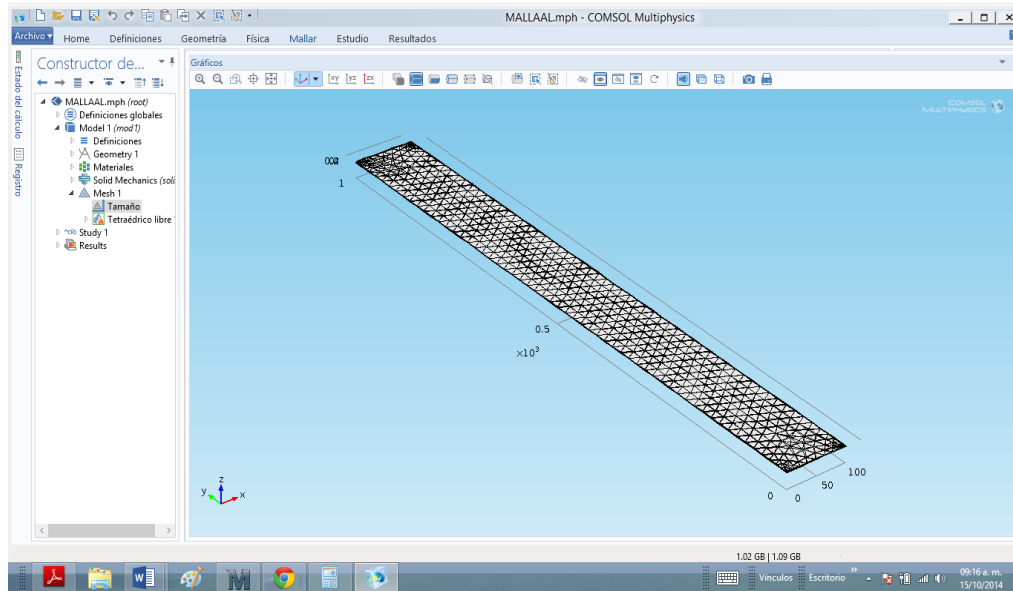
II. Malla para la capa de sacrificio Si:



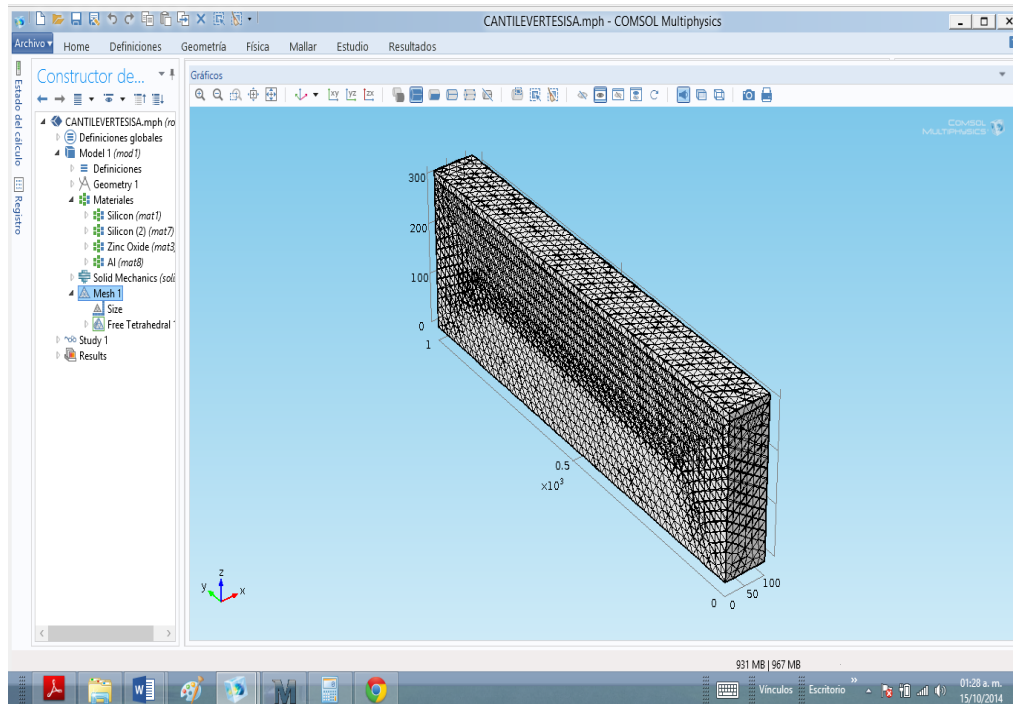
III. Malla para el piezoelectrico ZnO:



IV. Malla para Al:



V. Malla para la microestructura completa:

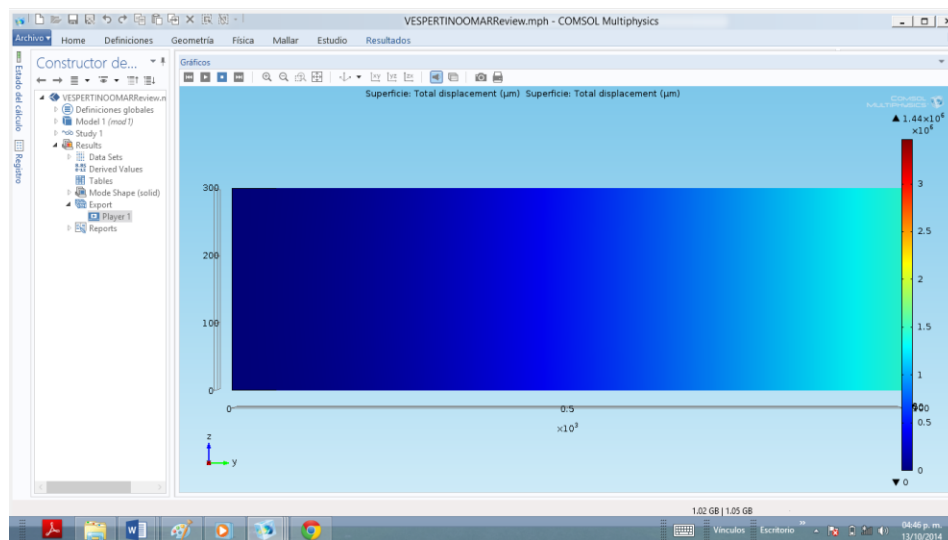


Para complementar el ciclo de simulación y análisis con COMSOL MULTIPHYSICS se arrojaron los siguientes resultados:

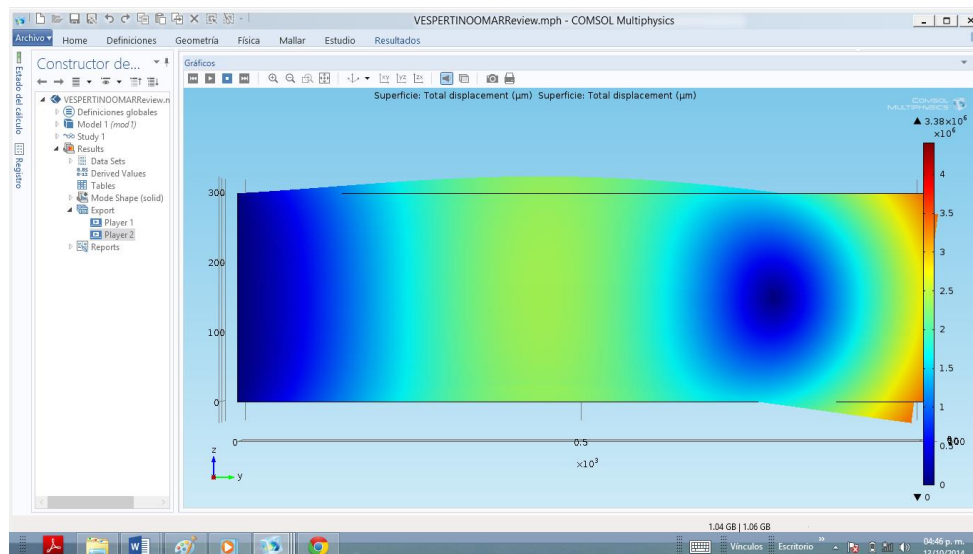
Tomando en consideración el barrido de frecuencias simuladas en MATHCAD y aplicándolas a cada material con el COMSOL MULTIPHYSICS se obtuvieron los siguientes resultados:

A. Para el sustrato de Si:

a) con carga estática y sin masa adicional:

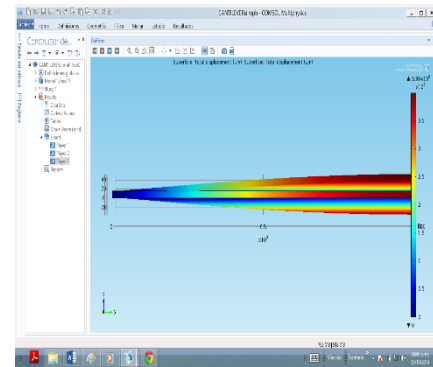
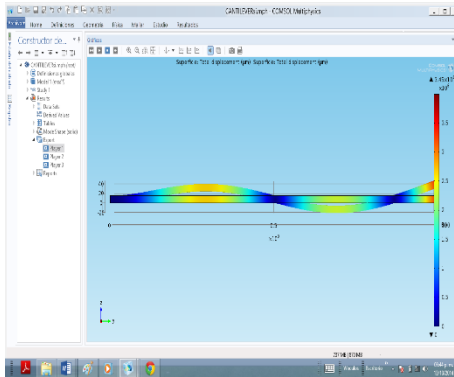


b) sin carga estática y con masa adicional:

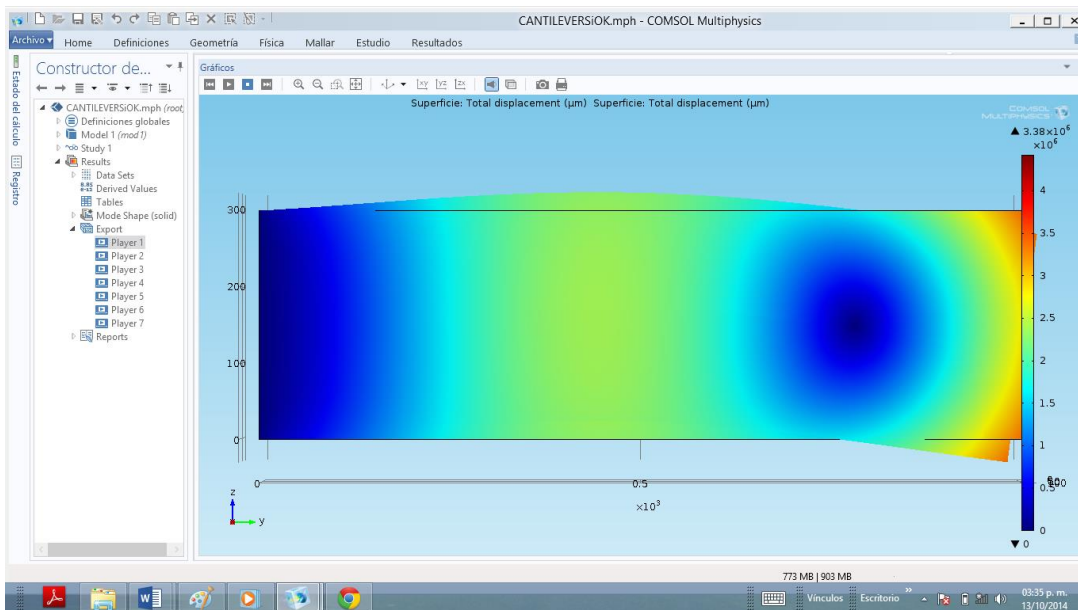


B. Para la capa de sacrificio Si:

a) con carga estática y sin masa adicional:

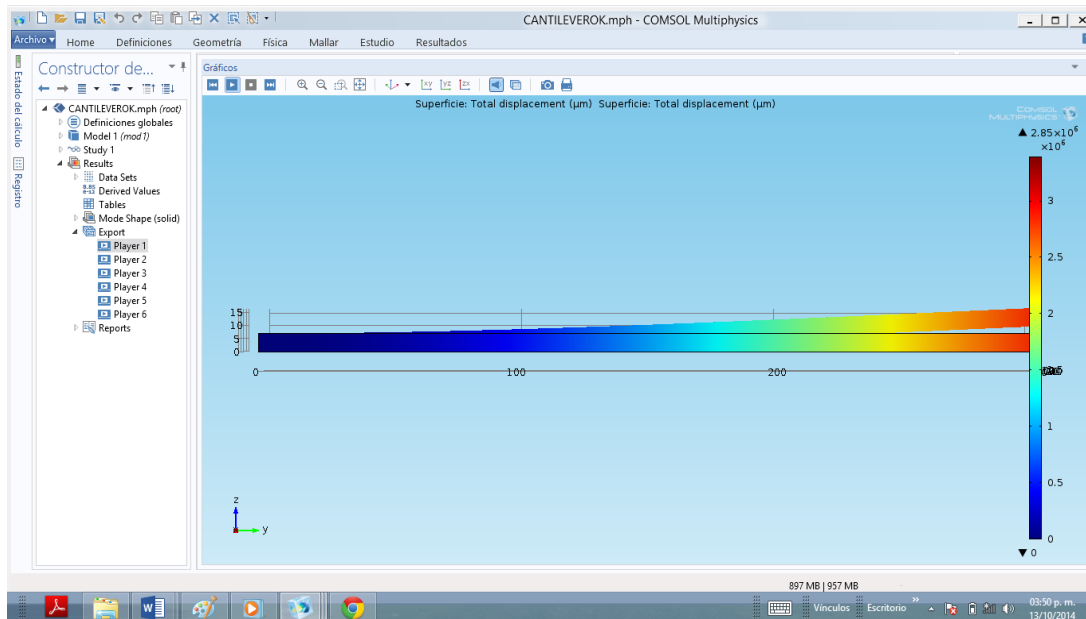


b) sin carga estática y con masa adicional:

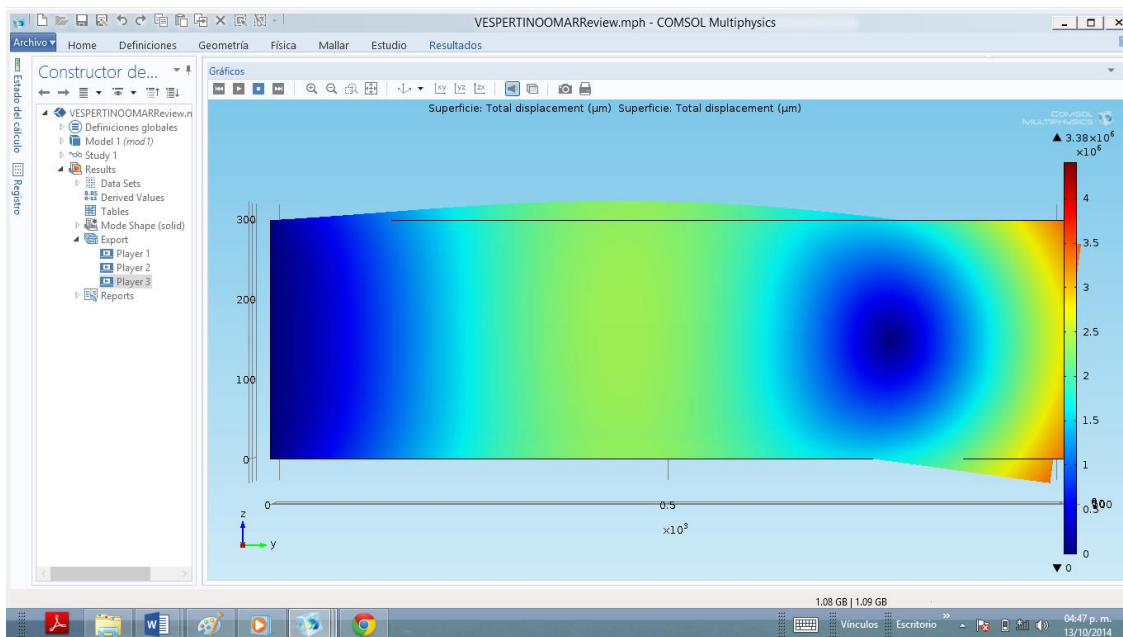


C. Para la capa del piezoeléctrico ZnO:

a) con carga estática y sin masa adicional:

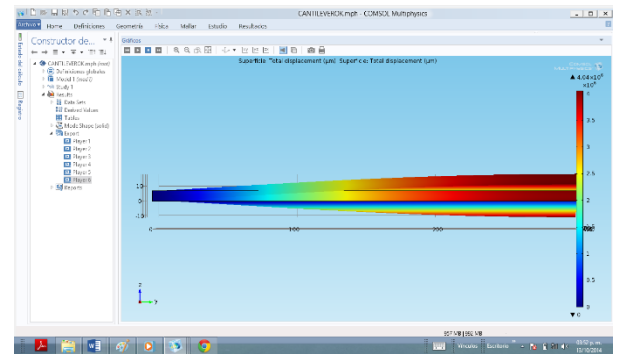
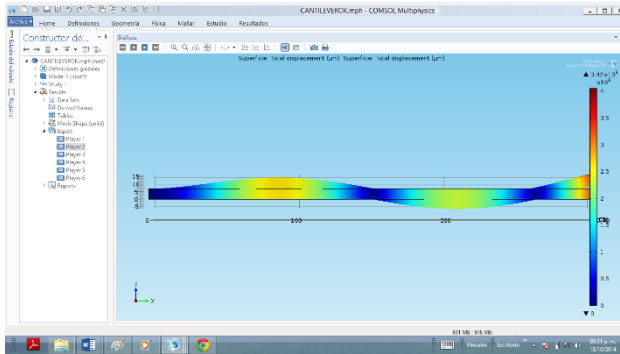


b) sin carga estática y con masa adicional:

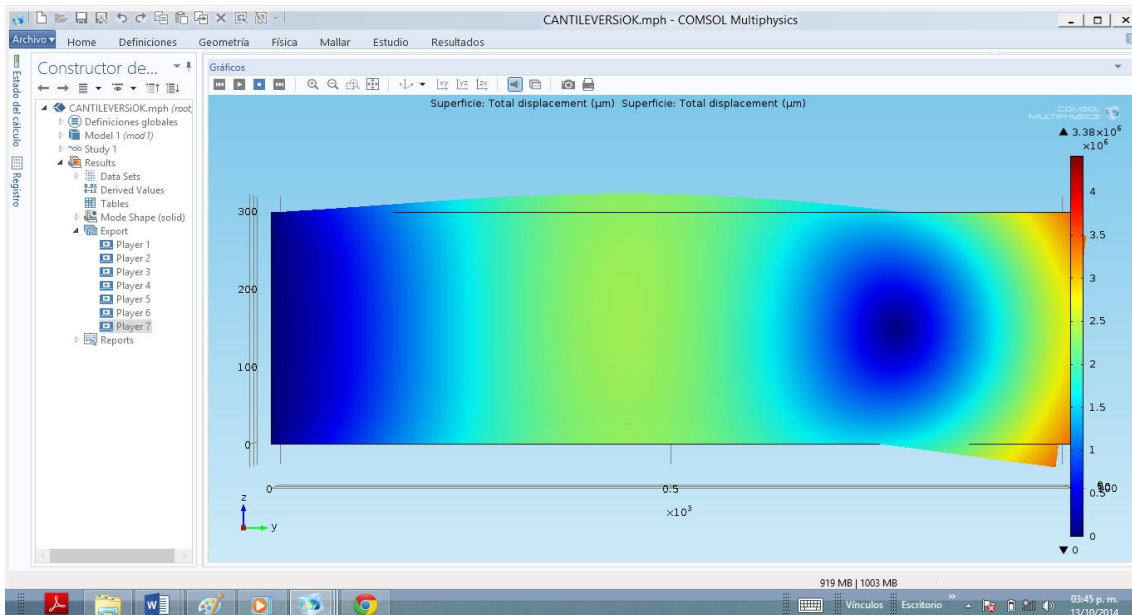


D. Para la capa del Al:

a) con carga estática y sin masa adicional:

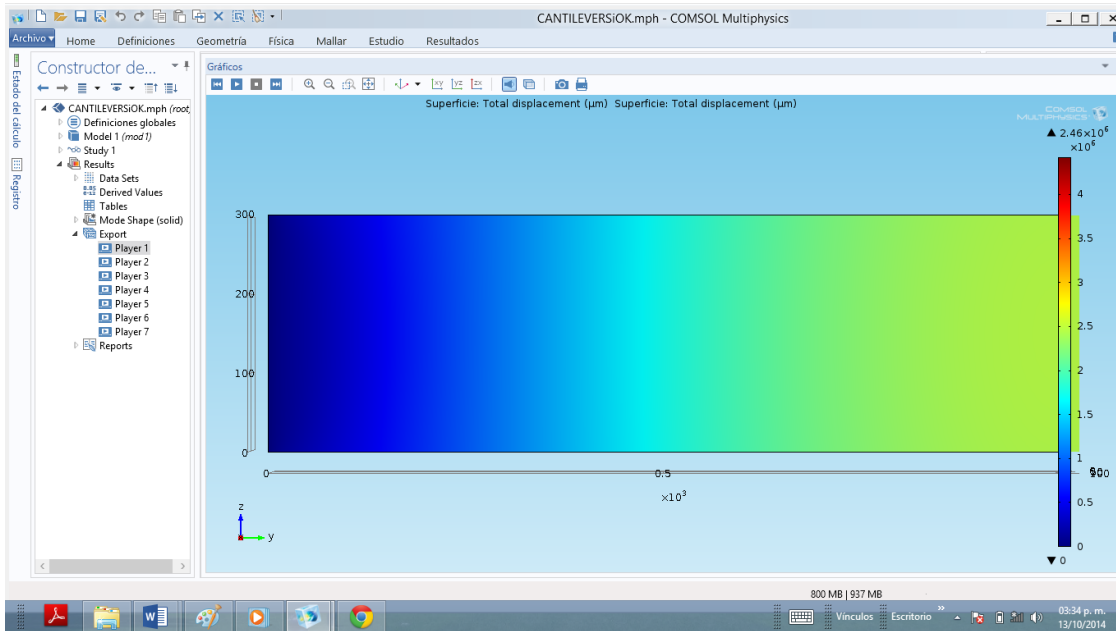


b) sin carga estática y con masa adicional:

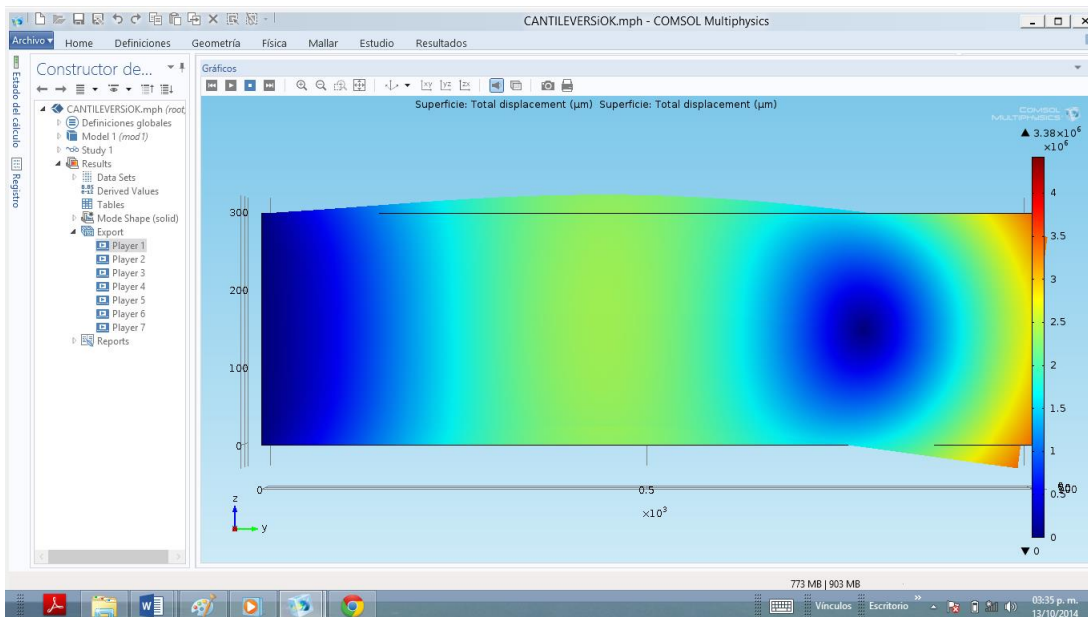


E. Para toda la microestructura de las cuatro capas se obtuvo lo siguiente:

a) con carga estática y sin masa adicional:



b) sin carga estática y con masa adicional:



3.4 Resultados y conclusiones

Como podemos apreciar se puede concluir lo siguiente:

- ✚ Que el desplazamiento estático o dinámico, la respuesta a la frecuencia y la deformación son los parámetros que determinan el comportamiento mecánico de la microestructura.
- ✚ Que los cambios de frecuencia de resonancia permitan detectar en MATHCAD la masa del orden de microgramos o nanogramos a través del resonador mecánico.
- ✚ Que a corto plazo se pueda ver la viabilidad de fabricar y ojalá sirva de base para investigaciones posteriores en esta línea de investigación de tal suerte que contribuya al desarrollo de la medicina.

▪ BIBLIOGRAFÍA

- [3.1]. History of piezoelectricity. <http://www.piezo.com/tech4history.html>
- [3.2]. Push-me energía verde piezoeléctrica facultad de ciencias físicas y matemáticas universidad de Chile.
- [3.3]. Fundamentals of piezoelectricity material and properties http://www.physikinstrumente.com/tutorial/4_15.html
- [3.4]. The piezoelectric effect. <http://piceramic.de/piezoэффект3.html>
- [3.5]. Piezo electric ceramic <http://www.piceramic.de/site/piezo.html>
- [3.6]. Donald R. Askeland “Ciencia e ingeniería de los materiales” cuarta edición año 2004 editorial Thompson pág. 33 y 34.
- [3.7]. Aplicaciones de PZT components. <http://www.piceramic.de/site/anwendungen.html>
- [3.8]. <http://www.rexolite.com/list.html>
- [3.9]. Lorente Gassó José Maria. “Transductores de ultrasonido ” INYP-AYPD/ultrasonidos/trabajo%20ultrasonidos.pdf
- [3.10]. Thomas A. Morore “Física seis ideas fundamentales Tomo 2” segunda edición editorial McGraw Hill pág 542-558.
- [3.11]. <http://www.slideshare.net/jackriden/fisica-de-ultrasonido1>
- [3.12]. Ever J. Barbero “Finite analysis of composite materials” editorial CRC Press pág 35-105.
- [3.13]. Metodología para la evaluación del Crosstalk en transductores ultrasónicos matriciales. 2003 tesis de maestría Universidad Federal de Rio de Janeiro Brasil. Programa de ingeniería biomédica.
- [3.14]. http://www.piceramic.com/pdf/piezo_material.pdf

- [3.15]. http://www.insulcast.com/pdf/3025_IC501.pdf
- [3.16]. D. Cerniglia, A Pantano, N.Montinaro “3D simulation and experiments of guide wave propagation in adhesively bonded multi-layered structures”
Revista NTD&E International 43 (2010) pág 527-535.
- [3.17]. http://www.quimilock.es/adhesivos/muestra_doc_nivel2.php?IdDoc=155&%3Bcategoria=&%3BIdProd=
- [3.18]. <http://pr37.quiminet.com/Pegamento%2BCianoacrilato.htm>
- [3.19]. Manual de Comsol 3.5: Manual Structural Mechanics Module pág. 10-21,
Versión 3.5, Septiembre 2008.
- [3.20]. Manual de Comsol 3.5: Manual Structural Mechanics Module pág. 417-427,
Versión 3.5, Septiembre 2008.
- [3.21]. Manual de Comsol 3.5: Manual Structural Mechanics Module pág. 417-427,
Versión 3.5, Septiembre 2008.

DISEÑO Y FABRICACIÓN CANTILEVER PIEZOELÉCTRICO ZnO

CAPÍTULO

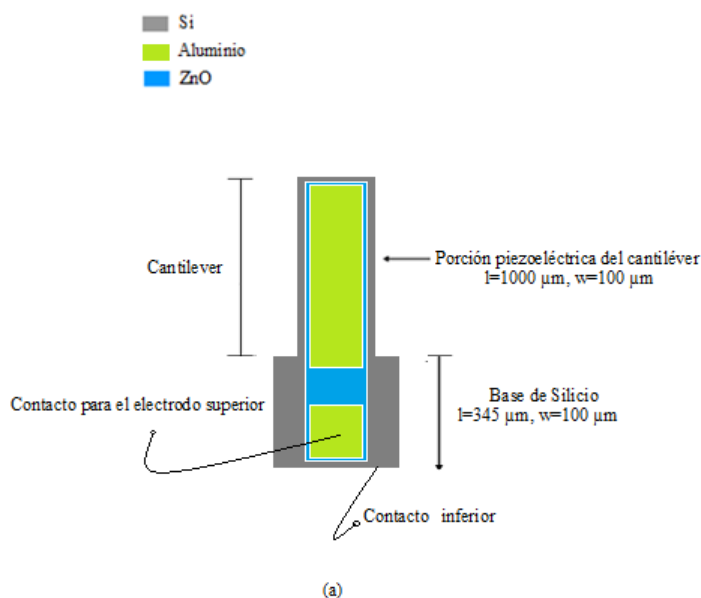
4

Para lograr el objetivo de este capítulo utilizaremos películas de ZnO que poseen buena piezoelectricidad. Además se describe el diseño y proceso de fabricación de un piezocantilever.

4.1 Diseño de la Máscara

Las consideraciones de diseño para el piezocantilever son idénticas a las de un cantilever básico excepto de algunos detalles adicionales que se describirán a continuación.

La Fig. 4.1a muestra una vista de arriba hacia abajo y la Fig. 4.1b muestra la vista en sección transversal de un piezocantilever propuesto. El Si se usa como el material del cantiléver mientras que el ZnO es utilizado como material piezoeléctrico y el Al se utiliza como material de los electrodos para este proyecto.



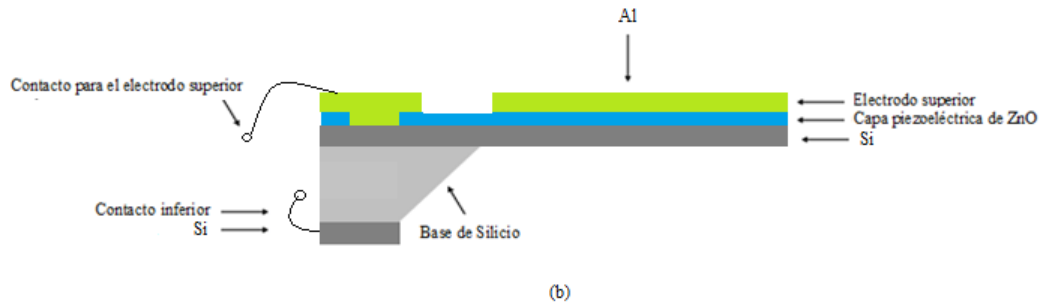


Fig. 4.1 (a) vista superior y (b) vista transversal del diseño de un piezocantilever

El piezocantilever requiere de dos contactos uno superior y otro inferior. El piezoeléctrico ZnO se excita cuando un voltaje es aplicado a través del espesor del material o viceversa produciéndose una señal eléctrica cuando el cantiléver se tensa, por lo tanto, el diseño de la máscara debe ser en razón de que tanto en la superficie de contacto como en el electrodo superior se pueda acceder por medios externos. El diseño del electrodo superior únicamente requiere una superficie eléctrica suficientemente grande para unir cables. El acceso al contacto inferior se lleva a cabo mediante el diseño de una abertura cuadrada en la capa de Si para permitir hacer contacto eléctrico.

El diseño del piezocantilever se compone de dos partes: la primera parte contiene ZnO en la parte superior del Si. La región con ZnO es la región del sensor/actuador y como resultado de la adición de materiales es relativamente rígido.

Minne sugirió que la sensibilidad del cantilever puede aumentar mucho si la mayoría del piezocantilever contiene la película de ZnO y además no cubra grandes porciones de la base. Algunas partes del ZnO que están cubriendo la base son insensibles a la vibración del cantilever. Por lo tanto, este piezocantilever es diseñado con esto en mente.

4.1.1.Consideraciones del Equipo.

El equipo debe estar diseñado para procesar obleas de 4", otro paso en la fabricación es el depósito de ZnO. El sistema sputtering RF utilizado para depositar ZnO es para sustratos no mayores a 2" de diámetro y no más pequeños a 1.5" cuadrada, por lo tanto la máscara necesitó ser diseñada en razón de permitir modificaciones en el tamaño del sustrato.

Una solución fácil fue planear dividir la oblea de 4" en cuartos después de haber terminado el proceso MN, el uso de secciones de estos cuartos significaba que los sustratos serían compatibles con el soporte del sistema RF del sustrato. Dos líneas perpendiculares fueron diseñadas en el trazo de la máscara quienes crearon profundas zanjás en el Si después del grabado con KOH facilitando la división de la oblea. El diseño del piezocantilever se restringió a cuatro pequeñas áreas de la oblea. Aunque esto reduce en gran medida la cantidad de espacio utilizable de la oblea se tuvo que hacer teniendo en cuenta las variaciones del sustrato sujetas en el equipo. La Fig. 4.2 muestra el diseño de la máscara para un cuarto de la oblea de 4". Los diferentes colores representan las diferentes capas (Las diferentes máscaras para cada material).

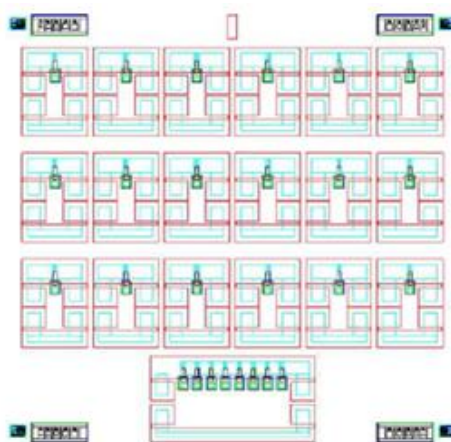


Fig. 4.2 Diseño de la mascarilla del cantilever piezoeléctrico donde los diferentes colores representan las diferentes capas.

4.1.2. Dimensiones del cantilever.

Puesto que el espesor de todos los materiales fue fijo para cada oblea, los parámetros de diseño son largo y ancho como se cita con anterioridad, el cantilever actual consiste en: contiene el electrodo superior en la capa de Al y el contacto en el Si, y la capa del piezoeléctrico midiendo de largo 1000 μm y ancho 100 μm .

4.2 Pasos de fabricación del piezocantilever

4.2.1. Generalidades.

Se pueden diseñar MEMS y se procesan Circuitos CMOS cuyas obleas miden 4", se pueden hacer depósitos de capas de Si, fotolitografía, alineación de la máscara frontal y posterior y grabado de plasma de la parte frontal y posterior de la capa de silicio, además el grabado de KOH, el resto de los pasos fueron ejecutados son hacer los depósitos del electrodo superior como el contacto inferior, depósito de ZnO, fotolitografía y grabado, asimismo se graba el Si.

Se diseñan CMOS con obleas de 3" (o sustratos más pequeños) mientras que el sistema sputtering RF es usado para depositar ZnO en sustratos cuadrados de 2", por lo tanto, el intercambio de momento entre los iones y los átomos del material se hace para las obleas de 4", debido a colisiones. Las máscaras fueron diseñadas de modo que las obleas de 4" pudieron ser divididas en cuartos con bastante facilidad. Entre menor era el tamaño de los sustratos, estos funcionaban bien en el sistema sputtering y la litografía. Sin embargo, el cañón de haz de electrones del MRC era compatible sólo con las obleas de 3" para superar esta restricción se montaron sustratos de obleas falsas de 3" utilizando una cinta adhesiva de doble cara y después se monta en la máquina del evaporador. El proceso de fabricación se describe a detalle a continuación.

Los pasos del proceso para la fabricación del piezocantilever son idénticos que los de un cantiléver básico, la única diferencia consiste en que el grabado de KOH en el piezocantilever se hace en un tiempo posterior en relación a un básico, después del grabado de silicio y de la capa de sacrificio de silicio por la parte frontal y posterior se deposita una capa delgada de aluminio en la parte frontal de la oblea haciendo la función de electrodo del piezocantilever. El Al es depositado mediante un haz de electrones del evaporador, antes de cargar las muestras en la parte posterior del grabado del Si, grabado del silicio y en la parte frontal del Si, a continuación se deposita una capa delgada de aluminio en la parte frontal de la oblea quien actúa como el electrodo de fondo para el cantiléver piezoeléctrico. Antes de cargar las muestras en la cámara, las obleas de 4 pulgadas se dividieron en cuartos (como fue diseñado) y (ver Fig. 4.11). Las obleas se descargaron y luego se sumergieron en acetona para quitar la cinta adhesiva de doble cara.

El siguiente paso en el proceso fue el patrón para la capa de aluminio usando fotolitografía, las muestras giran a una velocidad de 4000 rpm durante 40 segundos entonces el fotoprotector permite alcanzar un espesor de resina fotosensible de 1.4 μm . Las muestras fueron recocidas suavemente en un horno durante 20 min. a 95°C para eliminar los disolventes de la resina fotosensible. A continuación las obleas son

retiradas del horno y alineadas con la máscara y se exponen a luz UV durante 70 seg, luego entonces las obleas se colocan en un horno a 120°C durante 25 min.

La primera capa de aluminio se grabó usando la receta de grabado PAN (Fig. 4.12) (PAN significa ácido fosfórico, ácido acético y ácido nítrico). Esta receta consistió en 40 ml H₃PO₄ (ácido fosfórico), 40 ml de CH₃COOH (ácido acético), 10 ml de HNO₃ (ácido nítrico), y 10 ml de agua, 2000Å de aluminio fueron grabados en 3 min y finalmente se retira el fotoprotector usando acetona y metanol.

Después de que el contacto inferior fue modelado y grabado, el ZnO fue depositado (Fig. 4.13) con un espesor de 1µm usando sputtering. A continuación la capa de ZnO necesita ser modelado y grabada usando fotolitografía, luego se aplica la fotoresina, se expone la oblea a la luz UV a través de la máscara de ZnO y luego se trabajó en la solución reveladora.

El ZnO fue grabado (Fig. 4.14) en un 1: 1: 30 de ácido acético: ácido fosfórico: solución de agua con una velocidad aproximada de grabado de 5000 Å/min., después el ZnO fue modelado y grabado y se retira la fotoresistencia, se necesitó depositar y modelar la capa del electrodo superior.

El método preferido fue usar un proceso de desprendimiento ya que no queremos grabar accidentalmente el contacto inferior en el Si al realizar el grabado del electrodo superior de Al. En el proceso de desprendimiento la fotoresistencia es aplicada a la oblea antes del depósito del material deseado (en nuestro caso Al). Luego el metal se deposita sobre toda la oblea. Las áreas donde se cubre de metal en la parte superior de la fotoresistencia son retiradas cuando la oblea se sumerge en acetona.)

La forma de la mascarilla para el electrodo superior fue diseñada mediante un proceso de fotolitografía negativa que se requiere para retirar en lugar de la fotolitografía positiva. El proceso de fotolitografía negativo fue muy similar al positivo habiendo una diferencia de dos pasos adicionales. El primero consiste cuando las fotoresinas giran sobre la oblea (Fig. 4.15) y el segundo se expusieron a la luz UV idéntico que en la fotolitografía positiva. A continuación, la oblea se colocó sobre una placa calefactora a 110 °C durante 90 s en un horno para la reversión, entonces la oblea fue colocada en la parte posterior de la mascarilla alineada durante 100 s (sin mascarilla se realizó el alineamiento). La exposición a la humedad aumenta la solubilidad y mejora en gran medida la selectividad y la resolución, la oblea esta lista para la metalización.

A continuación, la oblea se unió a una oblea falsa de 3" utilizando cinta adhesiva de doble cara, aproximadamente 2000 Å de Al es evaporado sobre las obleas (Fig. 4.16).

Tras la eliminación del evaporador, la cinta adhesiva de doble cara se retiró usando acetona entonces el metal no deseado es retirado de las obleas mediante un baño de acetona en ultrasonido de 15-20 min (Fig. 4.17).

El siguiente paso en el proceso es utilizar KOH para grabar más silicio el silicio, asimismo se ataca con KOH el Al, el lado frontal de la oblea necesita ser protegida. Una cera negra fue escogida en este proceso basada en su resistencia para KOH, esta se disolvió en una pequeña cantidad de tolueno y se viertó el líquido sobre la parte frontal de la oblea (Fig. 4.18).

La oblea se coloca sobre una placa calefactora a 50 °C para evaporar el tolueno. La oblea se deja durante la noche para asegurar que todo el tolueno se evapore y que la cera se endurezca para que después la oblea se sumerga en una solución de KOH al 20% a 48 °C. Una solución a una temperatura más alta no es factible porque la cera negra se funde a 60 °C. No es recomendable grabar completamente a través de la oblea usando la solución KOH porque una vez que todo el silicio se graba, el KOH puede filtrarse a través de pequeños capilares y atacar al aluminio en la parte frontal de la oblea, por lo tanto, aproximadamente 50 μm de la oblea fue grabada en KOH (Fig. 4.19).

Cuando la base de Si se mantiene aproximadamente en 50 μm , las obleas se retiran del KOH y la cera negra de la oblea se elimina tolueno (Fig. 4.20).

El resto del silicio fue grabado usando Deep Reactive Ion Etcher (DRIE) en el MRC (Fig. 4.21).

El paso final del proceso fue depositar Al en el lado posterior del piezocantilever (Fig. 4.22).



La Fig. 4.3 nos muestra el comienzo del proceso con un pulido (100) de la oblea del Si de doble cara.



Fig. 4.4 nos muestra un depósito de 15 μm de espesor en ambos lados de una capa de Si.

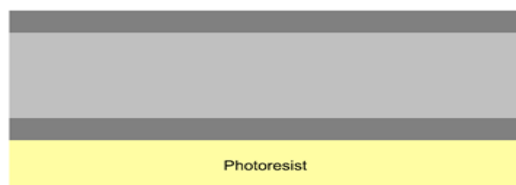


Fig. 4.5 muestra la parte posterior de la oblea cubierta con fotoresistencia.



Fig. 4.6 muestra las áreas específicas de resina fotosensible expuesta a la luz UV.



Fig. 4.7 nos muestra el grabado de KOH y tiene como objetivo eliminar las áreas expuestas de Si.



Fig. 4.8 indica como la fotoresistencia se elimina después de haber usado acetona y metanol.



La Fig. 4.9 las obleas son sumergidas en una solución de KOH al 30%. Se graba anisotrópicamente la capa de sacrificio de Si con KOH sin dañarlo, solamente el 60% de la oblea es grabado para facilitar todo el proceso.



Fig. 4.10 El lado frontal de la oblea fue fotolitografiada. El patrón del lado frontal define la estructura del cantilever.

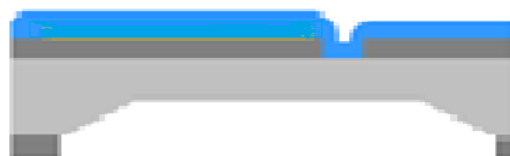


Figura 4.11 Un sistema de pulverización catódica magnetron RF se utiliza para depositar el piezoeléctrico ZnO.



Fig. 4.12 El ZnO es fotolitografiado y las áreas no deseadas son grabadas en ácido débil



Fig. 4.13 El frente de la oblea es cubierto con fotoresina, este paso es para preparar el retiro del Al.



Fig. 4.14 0.5 μm de Al es evaporado en la parte superior del fotoresistor.



Fig. 4.15 La oblea es entonces bañada con acetona y las áreas no deseadas de fotoresistencia y Al son retiradas. Las capa de Al actúa como un electrodo superior para el piezo-cantilever



Fig. 4.16 Una capa gruesa de cera negra es aplicada al frente de la oblea. La cera negra es resistente al KOH y protegerá a las capas del metal y ZnO desde que esta siendo atacado por el KOH.



Fig. 4.17 La oblea se cubre con cera negra, es grabada al 20% en KOH a 48 °C (la cera se disuelve alrededor de los 60 °C). La oblea es grabada hasta tener aproximadamente 15 μm de silicio.



Fig. 4.18 La cera es removida mediante un baño en tolueno.

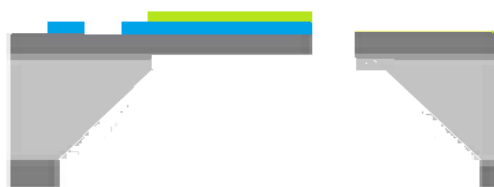


Fig. 4.19 El resto de los 15 μm de Si son grabado usando el grabado profundo por iones (DRIE).

▪ BIBLIOGRAFÍA

- [4.1] G. Binning, C.F. Quate, C. Gerber, Atomic Force Microscope, Physical Review Letters, 56, 9, 930, (1986)
- [4.2] www.veecoprobes.com
- [4.3] S.R. Manalis, S.C. Minne, C.F. Quate, Atomic force microscopy for high speed imaging using cantilever with an integrated actuator and sensor, Applied Physics Letters, 68 (5), 871, (1996)
- [4.4] B. Rogers, L. Manning, T. Sulchek, J.D. Adams, Improving tapping mode atomic force microscopy with piezoelectric cantilevers, Ultramicroscopy, 100, 267, (2004)
- [4.5] T. Itoh, T. Suga, Piezoelectric sensor for detecting force gradients in atomic force microscopy, Japanese Journal of Applied Physics, 33, 334, (1994)
- [4.6] S. Watanabe, T. Fuji, Microfabricated piezoelectric cantilever for atomic force microscopy, Review of Scientific Instruments, 67 (11), 3898, (1996)
- [4.7] P.F. Indermuhle, G. Schurmann, G.A. Racine, N.F. de Rooij, Fabrication and characterization of cantilevers with integrated sharp tips and piezoelectric elements for actuation and detection for parallel AFM applications, Sensors and Actuators A, 60, 186, (1997)
- [4.8] M.J. Madou, Fundamentals of Microfabrication, New York: CRC Press, (1997)
- [4.9] <http://ruby.colorado.edu/smyth/min/zincite.html>
- [4.10] T. Ikeda, Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford University Press, (1990), p.222
- [4.11] J.F. Rosenbaum, Bulk Acoustic Wave Theory and Devices, Artech House, (1988), p.455
- [4.12] S. Chu, W. Water, J. Liaw, Influence of postdeposition annealing on the properties of ZnO films prepared by RF magnetron sputtering. Journal of the European Ceramic Society, 23, 1593, (2003)
- [4.13] M.N. Kamalasanan, S. Chandra, Sol-gel synthesis of ZnO thin films, Thin Solid Films, 288, 112, (1996)
- [4.14] F.D. Paraguay, W.L. Estrada, D.R.N. Acosta, E. Andrade, M. Miki-Yoshida, Growth, structure and optical characterization of high quality ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, Thin Solid Films, 350, 192, (1999)
- [4.15] H. Funakubo, N. Mizutani, M. Yonetsu, A. Saiki, K. Shinozaki, Orientation control of ZnO thin film prepared by CVD, Journal of Electroceramics, 4:S1, 25, (1999)