



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



T E S I S

**“DISEÑO DE UN MICROSENSOR
DE HUMEDAD RELATIVA”**

PRESENTADA POR:

JOSUE FERNANDO PEREZ MARTINEZ

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO ELECTRICO Y ELECTRONICO**

DIRECTOR: M. I. EDUARDO RAMIREZ

MEXICO D. F.

2008

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres por todo su amor, su cariño, paciencia y confianza en mí, esto es por ustedes y para ustedes.

Gracias. Los quiero mucho.

También quiero agradecer a mis hermanos Alejandro y Arturo por todo su apoyo y su comprensión.

A todos y cada uno de mis amigos y amigas, con los que he compartido grandes momentos así como situaciones difíciles. ¡¡¡Gracias a todos ustedes!!!!

A mis familiares, gracias por su apoyo.

A la Facultad de Ingeniería y a la UNAM por proporcionarme todo ese conocimiento invaluable.

A mis profesores y sinodales, gracias por sus observaciones, comentarios y sus ánimos.

Al Ing. Ramírez por toda su paciencia.

Josué Fernando Pérez Martínez

Mayo 2008

INDICE

1	<i>Introducción y Fundamentos</i>	5
1.1	Humedad	5
1.2	Sensores de humedad relativa	6
1.2.1	Higrómetro	6
1.2.2	TDR	7
1.2.3	SBIB	8
1.2.4	Psicometría por bulbo húmedo/bulbo seco	9
1.2.5	Sensores capacitivos	10
1.2.6	Deshumidificador	11
1.3	Aplicaciones de los sensores de humedad relativa	12
1.3.1	Industriales	12
1.3.2	Impresiones Ink Jet (inyección de tinta)	13
1.3.3	Humedad en suelos agrícolas.....	14
1.3.4	Humedad en almacenes	14
1.3.5	Humedad en incubadoras.....	15
1.3.6	Humedad en medicina	15
2	<i>Bosquejo del dispositivo propuesto</i>	16
2.1	Materiales	16
2.1.1	Polisilicio	16
2.1.2	Silicio Mono Cristalino	18
2.2	Proceso Czochralski	19
2.3	Piezo resistividad en el silicio monocristalino	20
2.4	Tipos de Sensores	26
2.4.1	Conceptos básicos sobre Sensores.....	26
2.4.2	Sensores basados en cantilevers de silicio	27
2.4.3	Propiedades mecánicas de los cantilevers.....	28
2.4.4	Características de los sensores estáticos o DC.....	29
2.4.5	Características de los sensores Dinámicos o AC	30
2.4.6	Técnicas de detección para cantilevers resonantes	32
3	<i>Polímeros para microelectrónica</i>	34
3.1	Polyimide como capa sensible	35
3.1.1	El polyimide no fotosensible	37
3.1.2	Características de la adherencia.....	38
3.1.3	Absorción y transporte de la humedad en polyimides	40
4	<i>Esfuerzo y deformación</i>	42
4.1	Esfuerzo	43
4.2	Deformación	44
4.3	Esfuerzo y deformación en una estructura de viga	44
4.3.1	Esfuerzo, Deformación en una viga deflexionada	44
4.3.2	Flexión de viga compuesta por capas por una deformación residual.....	47
5	<i>Propuesta de diseño</i>	54
6	<i>Simulación mediante el Modelo de Elemento Finito</i>	59

6.1 Simulación en Coventor	60
7 Conclusiones.....	74
<i>Bibliografía</i>	75

1 Introducción y Fundamentos

1.1 Humedad

Es la cantidad de agua contenido en el aire, en un lugar e instante determinados. Depende de la temperatura, de forma que resulta mucho más elevada en las masas de aire caliente que en el aire frío.

La humedad atmosférica se puede expresarse en valor absoluto (humedad absoluta), indicando la masa de vapor de agua contenida en un litro de aire, pero es más significativo su valor relativo, ya que la cantidad máxima posible de vapor de agua presente en el aire (saturación) es variable y depende de la temperatura.

La humedad relativa del aire es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que existe en la atmósfera y la máxima que podría contener, sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental.

Como la capacidad del aire para absorber humedad varía con la temperatura, la humedad relativa aumenta cuando desciende la temperatura; aunque la humedad absoluta se mantenga invariable.

Para la comodidad humana es mucho más interesante la humedad relativa puesto que cuanto mayor sea la capacidad del aire para absorber el vapor, mejor funciona el sistema de evapotranspiración, mecanismo de regulación de la temperatura del cuerpo, aunque si es excesivamente baja, se secan las mucosas (nariz, boca) y es más propenso a la entrada de microbios patógenos. El grado de humedad más adecuado para la comodidad del ser humano está comprendido entre 40 – 70%.

Para el clima, también es más interesante la humedad relativa, ya que una masa de aire saturado, o cercana a la saturación, es una masa de aire húmedo y las plantas pueden aprovechar esa humedad, mientras que de una masa de aire más seco no, aunque tenga mayor humedad relativa.

1.2 *Sensores de humedad relativa*

1.2.1 Higrómetro

Un higrómetro es un aparato que mide la humedad relativa del aire en base al cambio del largo de un pelo que no tiene grasa, que está de acuerdo con el contenido de vapor de agua en el aire, el alargamiento o acortamiento del pelo es

transmitido por medio de un sistema de palanca, al indicador de una escala graduada en el porcentaje de humedad relativa.

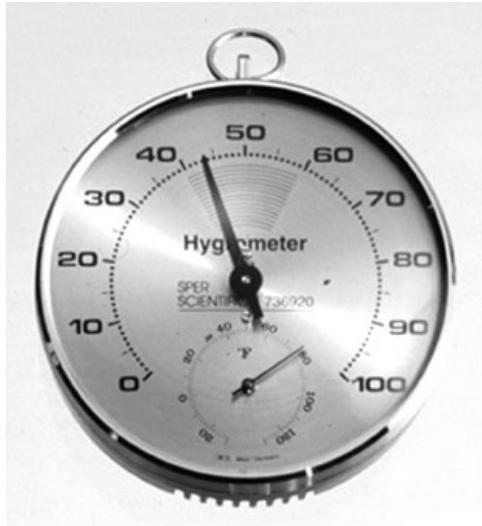


Figura 1.1Higrómetro

1.2.2 TDR

Se denomina TDR a los sensores de humedad del suelo. Su nombre viene de Time Domain Reflectometer y se basa en la medida de retraso (eco) de una señal eléctrica enviada a través de un material con agua.

Los TDR distan de ser perfectos y la precisión de la medida depende del tipo de suelo, aunque es perfectamente válido en la agricultura, pero inútil en desiertos o zonas de escasa precipitación o gran salinidad.



Figura 1.2 TDR

1.2.3 SBIB

El SBIB son las siglas de Self Balance Impedance Bridge.

Se trata de un sensor de humedad del suelo parecido al TDR pero de mayor sensibilidad y capaz de detectar y corregir aquellas condiciones en donde el TDR falla en la medición. Además realiza la medida en continuo sin necesidad de emitir pulsos, y tiene un tamaño mínimo.

Sin embargo su uso está especializado en suelos salinos o desérticos, es decir, normalmente poco fértiles. Esto limita su uso a la comunidad científica ya que para la agricultura las sondas tradicionales TDR cumplen su papel a la perfección.

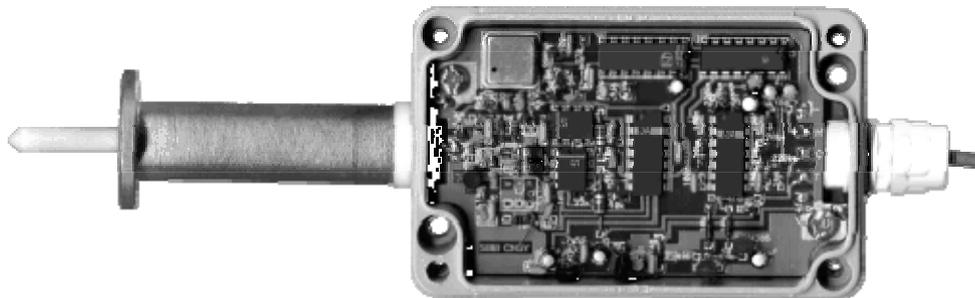


Figura 1.3 SBIB

1.2.4 Psicometría por bulbo húmedo/bulbo seco

La psicometría desde hace tiempo es uno de los métodos más populares para el monitoreo de la humedad debido a su simplicidad e inherente bajo costo. Un psicómetro industrial típico consiste de un par de termómetros eléctricos acoplados, uno de los cuales opera en estado húmedo. Cuando el dispositivo funciona, la evaporación del agua enfría el termómetro humedecido, resultando una diferencia medible con la temperatura ambiente o la temperatura del bulbo seco. Cuando el bulbo húmedo alcanza su máxima caída de temperatura la humedad puede determinarse comparando la temperatura de los dos termómetros en una tabla psicométrica.

El psicómetro provee una alta precisión en las proximidades del punto de saturación (100% RH) y es fácil de operar y reparar, por otra parte a baja humedad relativa (menos del 20%) el desempeño es pobre y el mantenimiento debe intensificarse. No puede utilizarse a temperaturas menores de 0° y, siendo el propio psicómetro una fuente de humedad, no puede utilizarse tampoco en ambientes pequeños o cerrados.

Los psicómetros son utilizados típicamente para control ambiental de recintos.



Figura 1.4 Psicómetro

1.2.5 Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos (polímero orgánico capacitivo) son diseñados normalmente con platos paralelos con electrodos porosos o con filamentos entrelazados en el sustrato. El material dieléctrico absorbe o elimina vapor de agua del ambiente con los cambios del nivel de humedad. Los cambios resultantes en la constante dieléctrica causa una variación en el valor de la capacidad del dispositivo por lo que resulta una impedancia que varía con la humedad. Un cambio en la constante dieléctrica de aproximadamente el 30% corresponde a una variación de 0-100% en la humedad relativa.

El material sensor es muy delgado para alcanzar grandes cambios en la señal con la humedad. Esto permite a el vapor de agua entrar y salir fácilmente y el secado rápido para la sencilla calibración del sensor.

Este tipo de sensor es especialmente apropiado para ambiente de alta temperatura porque el coeficiente de temperatura es bajo y el polímero dieléctrico puede soportar altas temperaturas. Los sensores capacitivos son también

apropiados para aplicaciones que requieran un alto grado de sensibilidad a niveles bajos de humedad, donde proveen una respuesta relativamente rápida. A valores de humedad superiores al 85% sin embargo el sensor tiene una tendencia a saturar y se transforma en no lineal.



Figura 1.5 Sensor Capacitivo

1.2.6 Deshumidificador

Consiste en una bomba de calor para proporcionar una zona fría donde *condensar* la humedad y una zona caliente para *recuperar la temperatura* ambiental. Su funcionamiento consiste en pasar una corriente de aire por el evaporador (zona fría), el cual está a una temperatura por debajo de la de rocío, provocando que la humedad ambiental se condense en el evaporador y esta gotee a un deposito o un desagüe. Después de ser secado y enfriado el aire pasa por el condensador (zona caliente), con lo que recupera la temperatura ambiental y disminuye aún más su humedad relativa.

A veces se puede producir hielo en la zona fría. En algunos aparatos, cuando detecta que la temperatura en la zona fría baja de 0 grados, se para la bomba de calor, pero se sigue moviendo el ventilador hasta que el hielo se derrita.

Podría parecer que el proceso no alteraría la temperatura ambiental o la disminuiría, pero resulta el efecto contrario. Debido a que el aire seco es más fácil de calentar y el proceso de condensar agua desprende calor debido al calor latente de vaporización la temperatura suele subir



Figura 1.6 Deshumificador

1.3 Aplicaciones de los sensores de humedad relativa

1.3.1 Industriales

Generalmente las fábricas de papel tienen una gran área de producción. En la etapa de fabricación en donde la pasta mojada pasa a la maquina de papel no se necesita humidificación, ya que el material contiene un nivel alto de humedad debido al agua contenida en la pasta evaporada y el agua que hay en el suelo.

Más adelante cuando la pasta se ha transformado en papel, esta pasa a través de varios cilindros secadores calentados, para remover la humedad del papel mojado. Cuando se ha secado a una humedad nominal de 5% de peso, el papel se pasa al “extremo seco” de la máquina. Es aquí donde el control de humedad es

importante, ya que a pesar de que el área usualmente esta bien ventilada, el cambio de ambiente de humedad puede afectar al papel cuando se enrolla al final de la fabricación.

El control de humedad se requiere para mantener la humedad en el papel, cuando se enrolla en la parte seca de la maquina de papel. Los rollos pueden ser hasta de 10 metros de ancho y 2 metros de diámetro. Cuando finaliza la máquina de papel, este queda expuesto a las condiciones ambientales por un tiempo considerable que puede variar entre 1 y 2 horas dependiendo la velocidad de la máquina. Por lo tanto, las superficies expuestas del papel cambiarán de humedad dependiendo de la humedad del ambiente.

Poca humedad en el área de corte puede causar perdidas y éstas se presentan rápidamente. Sin embargo, el daño al papel no es visible en este momento, ya que la tensión en el papel previene cualquier ondulación. Aunque en casos muy extremos puede romperse la banda de papel cuando hay un cambio de humedad ocasionando que el papel se rasgue. Por lo tanto es importante que se prevengan los cambios de humedad entre la humedad nominal de 5% en el papel y la humedad relativa de 55%.

1.3.2 Impresiones Ink Jet (inyección de tinta)

Las altas temperaturas y los altos niveles de humedad afectan adversamente a todos los materiales de la impresión en colores y deterioran más rápidamente las imágenes fotográficas tradicionales tratadas con cloruro de plata. El comportamiento de los materiales de inyección de tinta puede variar ampliamente, nuevamente dependiendo de los diferentes tipos de papeles usados y si las tintas son dye (tinte) o de pigmento. En condiciones de humedad, los impresos de inyección de tinta hechos con las tintas dye, en particular aquellos que han sido impresos en papeles porosos tienden a perder precisión y sufren de cambios en el balance y la densidad del color debido a la migración de los tintes. Las

impresiones de inyección de tinta con tintas basadas en pigmentos son mucho menos sensibles a las altas temperaturas y a la humedad alta que los impresos tradicionales de cloruro de plata y de inyección de tinta con tintas dye. Un almacenamiento prolongado de los impresos bajo condiciones de humedad puede producir el crecimiento de hongos, incluyendo aquellos de cloruro de plata.

1.3.3 Humedad en suelos agrícolas

Una causa significativa de la baja producción y el fracaso del cultivo en la agricultura es la falta de agua en el suelo. Esto se debe a la combinación de una lluvia escasa y errática con una mala utilización del agua disponible. El manejo de la humedad del suelo es, entonces, un factor clave cuando se trata de mejorar la producción agrícola. El incremento de la cantidad de agua almacenada en el suelo puede dar por resultado:

- Rendimientos más altos (si también existen suficientes nutrientes).
- Reducción del riesgo de pérdidas debido a la sequía.
- Recarga del agua subterránea, asegurando el nivel del agua en los manantiales y la continuidad de los flujos de ríos y cursos de agua.

1.3.4 Humedad en almacenes

Cuando se manejan hortalizas y frutas un aspecto a considerar es la humedad relativa del ambiente del almacén. La pérdida de agua del producto se asocia generalmente con una pérdida de calidad. Pues puede haber cambios visuales, tales como el marchitamiento o arrugado y cambios de textura.

Para el mercado de productos frescos, cualquier método que aumente la humedad relativa en el ambiente del almacén (o disminuya el déficit de presión de vapor entre el producto y su entorno) retrasará la pérdida de agua. Un método para aumentar la humedad relativa consiste en reducir la temperatura; otro método

consiste en añadir humedad al aire alrededor de la mercancía utilizando nebulizadores, vaporizadores, o mojando el piso del almacén. Otra forma es utilizar barreras de vapor tales como ceras, forros de polietileno en cajas, cajas revestidas o una variedad de materiales de empaque económicos y reciclables. Cualquier material de empaque disminuirá la eficiencia del enfriado, de forma que, por ejemplo, se recomiendan los forros horadados (aprox. 5% del área total del forro), pues éstos disminuirán el déficit de presión de vapor sin afectar significativamente al intercambio de oxígeno, etileno y dióxido de carbono.

1.3.5 Humedad en incubadoras

La humedad del aire dentro de una incubadora es un factor muy importante para lograr un ambiente térmico neutral, ya que un ambiente seco o con una humedad relativa baja perjudica las vías respiratorias del paciente. El control de la humedad relativa en una incubadora esta en el rango de 50% a 90%.

1.3.6 Humedad en medicina

Es importante para las personas que padecen de asma habitar en lugares con baja humedad relativa, entre 40% a 50%, pero si la personan vive en un lugar con humedad relativa mucho mayor, debe hacer uso de un deshumidificador para controlar la humedad.

2 Bosquejo del dispositivo propuesto

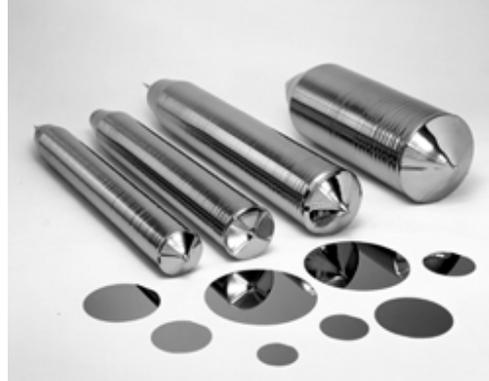
2.1 Materiales

2.1.1 Polisilicio

Los materiales más comúnmente utilizados para la fabricación de superficie micro maquinada de los dispositivos MEMS, son el polisilicio y el silicio (cristalino) como material estructural primario, Dióxido de silicio (SiO_2) como material de sacrificio y Nitruro de Silicio (Si_3N_4) para estructuras eléctricas de aislamientos.

El polisilicio se puede dopar durante o después de la deposición de la película usando técnicas de proceso estándares de los IC's (circuitos integrados). El SiO_2

puede crecer o depositarse sobre una amplia gama de temperaturas para conocer varios procesos y requerimientos de materiales.



Para las superficies micro maquinadas, el polisilicio es un material atractivo porque tiene características mecánicas que son comparables al silicio mono cristalino, el proceso de esta tecnología ha sido utilizada para aplicaciones de los circuitos integrados y es resistente a los ataques del Dióxido de Silicio (SiO_2).

Para los MEMS y las aplicaciones de los circuitos integrados, las películas delgadas de polisilicio son depositadas comúnmente por un proceso conocido como deposición de vapor químico de presión baja (LPCVD por sus siglas en inglés). Esta técnica de deposición fue comercializada a mediados de los años 70's y ha sido desde entonces un proceso estándar en la industria de la microelectrónica.

El polisilicio se compone de pequeños dominios de silicio mono cristalino llamados "granos", cuyas orientaciones y/o alineaciones varían a menudo con respecto a los otros. La aspereza observada a menudo en el polisilicio es una de las condiciones de la deposición.

La micro estructura del polisilicio es una función de las condiciones de la deposición. Durante la fabricación de dispositivos micro mecánicos, la película de polisilicio experimenta típicamente uno o más cambios de alta temperatura que puede causar la re-cristalización de los granos del polisilicio, conduciendo a la

reorientación de la película y del aumento significativo del tamaño del grano promedio. Por lo tanto, la aspereza de la superficie del polisilicio aumenta con los aumentos del grano, es un resultado indeseable desde el punto de vista de la fabricación, por que la aspereza superficial limita la resolución del patrón. Las superficies lisas se desean para muchas estructuras mecánicas, pues los defectos asociados a la aspereza superficial pueden actuar como inicialización de los puntos de falta de estructura. Para tratar estas preocupaciones, los procesos de pulido químico-mecánicos reducen la aspereza superficial con el retiro mínimo de película.

La resistencia del polisilicio se puede modificar por el dopaje de las impurezas con los métodos desarrollados para el dopaje del silicio mono cristalino. El dopaje del polisilicio se puede alcanzar durante la deposición (llamada dopaje 'in situ') o después de la deposición de la película por la difusión o la implementación del ion.

Las características eléctricas del polisilicio dependen fuertemente de la estructura del grano de la película. Los límites del grano proporcionan una barrera potencial a los portadores móviles de la carga, así afectando la conductividad de las películas. Para el polisilicio Fósforo-dopado, la resistencia disminuye mientras que la cantidad de fósforo aumenta para las concentraciones por arriba de $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$. Las técnicas convencionales para depositar películas de polisilicio para aplicaciones MEMS utilizando sistemas LPCVD con un grueso máximo áspero de $5 \mu\text{m}$.

2.1.2 Silicio Mono Cristalino

Del inglés Single Cristal, es un sólido cristalino en el cual el mallado cristalino de la muestra es continuo e intacto a los bordes de la muestra sin límites de grano. Lo contrario de una muestra de silicio mono cristalino es una muestra de policristal, que se compone de un número de cristales más pequeños conocidos como "crystallites" (cristalitos). Debido a una variedad de efectos entropicos sobre la

microestructura de sólidos, incluyendo los efectos de deformación de las impurezas y la movilidad de los defectos y de las dislocaciones cristalográficas, los monocristales de tamaño significativo son excesivamente raros en la naturaleza, y pueden también ser difíciles de producir en el laboratorio bajo condiciones controladas.

Por qué los límites del grano pueden tener efectos significativos en las características físicas y eléctricas de un material, los monocristales son de interés para la industria, por sus importantes usos industriales. El uso más notable en el uso del mono cristal, es en la fabricación de semiconductores.

La fabricación de mono cristales implica generalmente la construcción de una capa cristalina por la capa de átomos. Las técnicas para producir los mono cristales grandes (boules) incluyen el crecimiento lento de una semilla de cristal que rota en un baño fundido del material alimentador (Como el proceso Czochralski y la técnica de Bridgeman). Algunas técnicas de deposición de película fina se pueden utilizar por crecimiento epitaxial, formando una nueva capa de material con la misma estructura en la superficie de mono cristal existente.

2.2 Proceso Czochralski

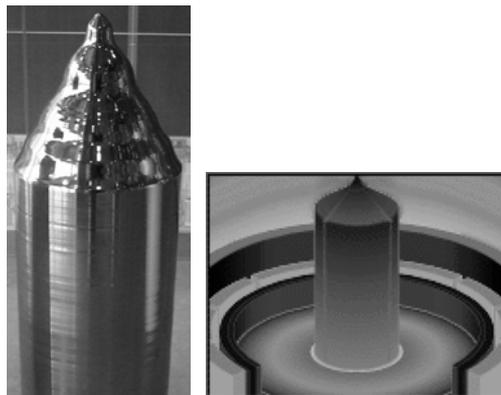
El proceso o método de Czochralski consiste en un procedimiento para la obtención de lingotes mono cristalinos. Fue desarrollado por el científico polaco llamado Jan Czochralski.

Este método es utilizado para la obtención de silicio monocristalino mediante un cristal semilla depositado por un baño de silicio. Es de amplio uso en la industria electrónica para la obtención de *wafers* o *semillas*, destinadas a la fabricación de transistores y circuitos integrados.

El método consiste en tener un crisol que contiene el semiconductor fundido, por ejemplo germanio. La temperatura se controla para que esté justamente por

encima del punto de fusión y no empieza a solidificarse. En el crisol se introduce una varilla que gira lentamente y tiene en su extremo un pequeño monocristal del mismo semiconductor que actúa como semilla. Al contacto con la superficie del semiconductor fundido, éste se agrega a la semilla, solidificándose con su red cristalina orientada de la misma forma que aquella, con lo que el monocristal crece. La varilla se va elevando y, colgando de ella, se va formando un monocristal cilíndrico. Finalmente se separa el lingote de la varilla y pasa a la fusión por zonas para purificarlo.

El grosor del lingote depende del control de temperatura y la velocidad de la varilla. Cuando la temperatura asciende, el propio lingote se va fundiendo, pero si desciende, se forman agregados que no son monocristalinos.



2.3 Piezo resistividad en el silicio monocristalino

La piezo resistividad es el cambio fraccionario en la resistencia inducida por el esfuerzo mecánico aplicado a un material. La mayoría de los materiales presentan piezo resistividad, pero el efecto es particularmente importante en algunos semiconductores.

Las dos aplicaciones principales de sensores piezo resistivos son de membranas (típicamente los sensores de la presión y de flujo) y cantilevers (típicamente

sensores de aceleración) con los resistores difundidos (boro, arsénico o fósforo) colocados estratégicamente en zonas de máxima tensión.

El silicio mono cristalino tiene una piezo resistividad alta y, combinado con sus propiedades mecánicas y electrónicas excelentes, hace un material magnifico para la conversión de la deformación mecánica en una señal eléctrica. Realmente, la historia de los sensores basados en silicio empezó con el descubrimiento del efecto de la piezo resistencia en el Silicio (Si) y Germanio (Ge) hace más de cinco décadas. La resistividad del silicio es una función lineal del esfuerzo, el cual es función de una presión aplicada.

Para un cristal anisótropo tridimensional, el vector del campo eléctrico (E) se relaciona con el vector (i) de 3 x 3. Los nueve coeficientes siempre se reducen a seis, y el tensor simétrico se da como:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \dots(2.3.1)$$

Para el enrejado cúbico del silicio, con los ejes alineados con <100>, ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 definen la dependencia del campo eléctrico de la corriente a lo largo de la misma dirección (una da las direcciones <100>); ρ_4 , ρ_5 y ρ_6 son la intersección de resistencias relacionando el campo eléctrico con la corriente a lo largo de la dirección perpendicular.

El cambio de resistencia se puede calcular como función de la tensión de la microestructura. El cambio de la resistencia bajo tensión son longitudinales (σ_l) y transversales (σ_t) con respecto al flujo de la corriente se tiene que:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t \dots (2.3.2)$$

Donde

σ_l = componente de tensión longitudinal, ejemplo la componente de tensión paralelo a la dirección de la corriente.

σ_t = componente de tensión transversal, ejemplo, componente de la tensión perpendicular a la dirección de la corriente.

π_l = coeficiente piezoresistivo longitudinal.

π_t = coeficiente piezoresistivo transversal.

Tabla 2.3.1 Resistencia y Piezoresistencia en la temperatura ambiente.

	ρ (Ωcm)	π_{11}^*	π_{12}^*	π_{44}^*
p-Si	7.8	+6.6	-1.1	+138.1
n-Si	11.7	-102.2	+53.4	-13.6

* Expresado en $10^{-12} \text{ cm}^2 \text{ dina}^{-1}$ o 10^{-11} Pa

La orientación de una membrana o de una viga es determinada por su fabricación anisotrópica. La superficie de una oblea de silicio es generalmente cortada con la orientación del plano (100); los bordes de las estructuras grabadas en agua fuerte son intersecciones de los planos (100) y (111) y son así direcciones de $\langle 100 \rangle$. Los piezoresistores tipo P son de uso más general, porque la orientación de la piezoresistividad máxima ($\langle 110 \rangle$) suele coincidir con la orientación del borde de un diafragma convencionalmente grabado al agua fuerte y porque el coeficiente longitudinal es áspero igual en magnitud pero de signo contrario respecto al coeficiente transversal (Figura 2.3.1). Con los valores de π_l y π_t de la tabla, ahora puede ser calculado numéricamente para cualquier orientación. El coeficiente piezoresistivo longitudinal en la dirección $\langle 110 \rangle$ es $\pi_l = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$. El coeficiente transversal correspondiente es $\pi_t = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$. De la tabla 2.3.1

sabemos que, para resistores tipo P, π_{44} es más importante que los otros dos coeficientes e igual o aproximado a:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \dots (2.3.3)$$

El resistor tipo n, π_{44} puede ser descuidado, y obtenemos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2} (\sigma_l + \sigma_t) \dots (2.3.4)$$

Las ecuaciones (2.3.3) y (2.3.4) son válidas solamente para los campos de tensión uniformes o si las dimensiones del resistor son pequeñas comparadas con el tamaño de la membrana o de la viga. Cuando la tensión varía sobre los resistores tienen que se integradas, que es lo más convenientemente posible con programas de simulación.

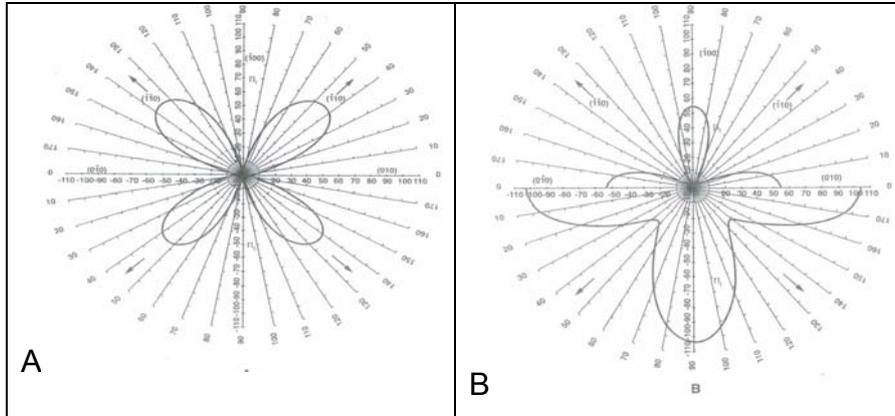


Figura 2.3. Coeficientes piezoresistivos π_l y π_t para silicio en el plano (100). (A) Para el tipo n en el plano (001) ($10^{-12} \text{cm}^2/\text{dina}$). (B) Para el tipo p en el plano (001) ($10^{-12} \text{cm}^2/\text{dina}$).

Convertir el efecto piezoresistivo en una señal eléctrica medible, es posible mediante un puente de Wheatstone. Una configuración equilibrada del puente de Wheatstone es construida como en la Figura (2.3.2.A) localizando cuatro piezoresistores tipo p a mitad de la distancia a lo largo de los bordes de un diafragma cuadrado como en la Figura (2.3.2.B) (la localización de la tensión máxima). Se orientan dos resistores de modo que detecten la tensión en la

dirección de sus ejes actuales y dos se colocan perpendiculares a la tensión del sentido del flujo actual. Dos resistores longitudinalmente tensionados (A) son equilibrados contra dos resistores transversales tensionados (B); dos de ellos incrementan su valor y los otros dos decremantan su valor sobre la aplicación de tensión. De la ecuación (2.3.3),

$$\frac{\Delta R}{R} = 70 \cdot 10^{-11} (\sigma_l - \sigma_t) \dots (2.3.5)$$

Con σ en [Pa]. Para el patrón realista de la tensión donde $\sigma_l = 10MPa$ y $\sigma_t = 50MPa$, de la ecuación (2.3.5) nos da $\Delta R/R \approx 2.8\%$.

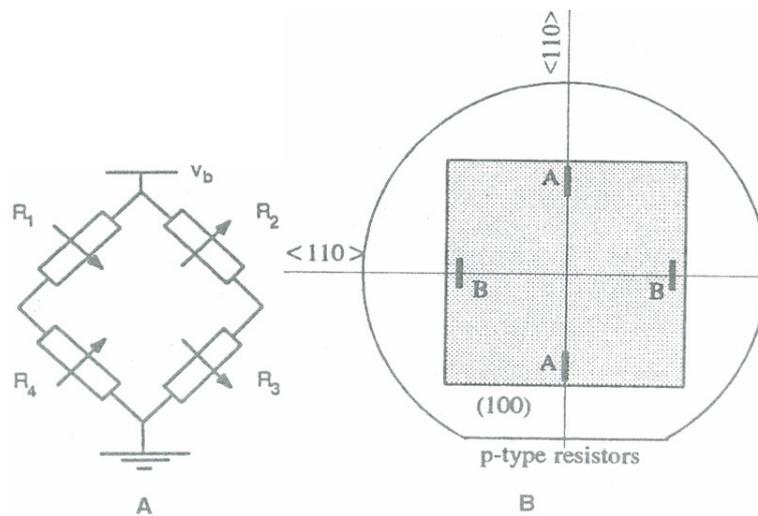


Figura 2.3.2 Midiendo en una membrana con los piezoresistores. (A) La configuración del puente de Wheatstone de cuatro piezoresistores indifundidos. Las flechas indican cambios de la resistencia cuando la membrana es presionada hacia abajo. (B) Maximización del efecto piezoresistivo con resistores tipo p. Los resistores de (A) se tensionan longitudinalmente y los resistores de (B) se tensionan transversalmente.

Variando el diámetro y grueso de los diafragmas del silicio, los sensores piezoresistivos en la gama de 0 a 200 MPa han sido hechos. Los voltajes del puente están generalmente entre 5 y 10 volts, y la sensibilidad puede variar a partir de 10 mV a 0.001 mV.

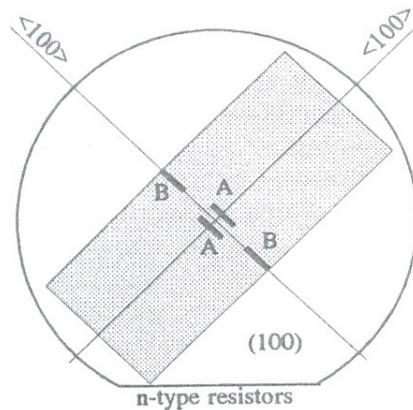


Figura 2.3.3 Una sensibilidad más alta de la presión por la colocación estratégica de piezoresistores en-difundidos propuesta por Peeters. Los resistores *n* se tensionan longitudinalmente con los resistores de (A) bajo tensión extensible, y los resistores de (B) bajo tensión compresiva.

Peeters demostró como un dispositivo más sensible se podría basar en resistores tipo *n*, cuando todos los tipos *n* están orientados a lo largo de la dirección <100> se sujetan a un patrón uniaxial de la tensión en el eje longitudinal, según las indicaciones de la Figura 2.3.3. El coeficiente máximo de piezoresistividad (π_l en la dirección <100>) es substancialmente más alto para el silicio tipo *n* que el que está para el silicio tipo *p* en cualquier dirección (máximo π_t y π_l en la dirección <100>, Figura 2.3.1). La explotación de estos altos coeficientes de piezoresistividad es menos obvia, puesto que la orientación del resistor para la sensibilidad máxima (<100>) se rota sobre 45° con respecto a los bordes de <110> de un diafragma anisotropico grabado al agua fuerte. También es evidente en la Figura 2.3.3 que un resistor transversal tensionado no puede ser equilibrado contra un resistor longitudinalmente tensionado. Peeters ha evitado estas objeciones por un patrón uniaxial, longitudinal de la tensión en el diafragma rectangular representado en la Figura 2.3.3. Con el sustrato de (100) y una orientación de <100> (45° en la oblea plana) obtenemos:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 53 \cdot 10^{-11} \cdot \sigma_t - 102 \cdot 10^{-11} \cdot \sigma_l \dots (2.3.6)$$

Donde σ esta en Pa. Basado en la ecuación (2.3.6), donde $\sigma_t = 10MPa$ y $\sigma_l = 50MPa$, $\Delta R/R \approx -4.6\%$. En el patrón propuesto de la tensión es importante reducir al mínimo la tensión transversal haciendo el dispositivo verdaderamente uniaxial como los componentes longitudinales y transversales de la tensión tienen efectos opuestos, estos y pueden incluso cancelar.

El efecto piezoresistivo se describe a menudo en términos de factor de la galga, G, definido como:

$$G = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R} \dots (2.3.7)$$

Con éste el cambio relativo del resistor dividido por la tensión aplicada. El factor de la galga de una galga de tensión de metal es típicamente alrededor de 2, por que el silicio de mono cristal es de 90, y para el silicio policristalino es cerca de 30.

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 comparables con la fabricación de circuitos integrados, siendo la escala de estos dispositivos desde las décimas de micra hasta los cientos de micra.

2.4 Tipos de Sensores

2.4.1 Conceptos básicos sobre Sensores

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, cualquier magnitud física del mundo real y transformarla en una magnitud eléctrica (generalmente corriente, carga, tensión o impedancia).

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.

2.4.2 Sensores basados en cantilevers de silicio

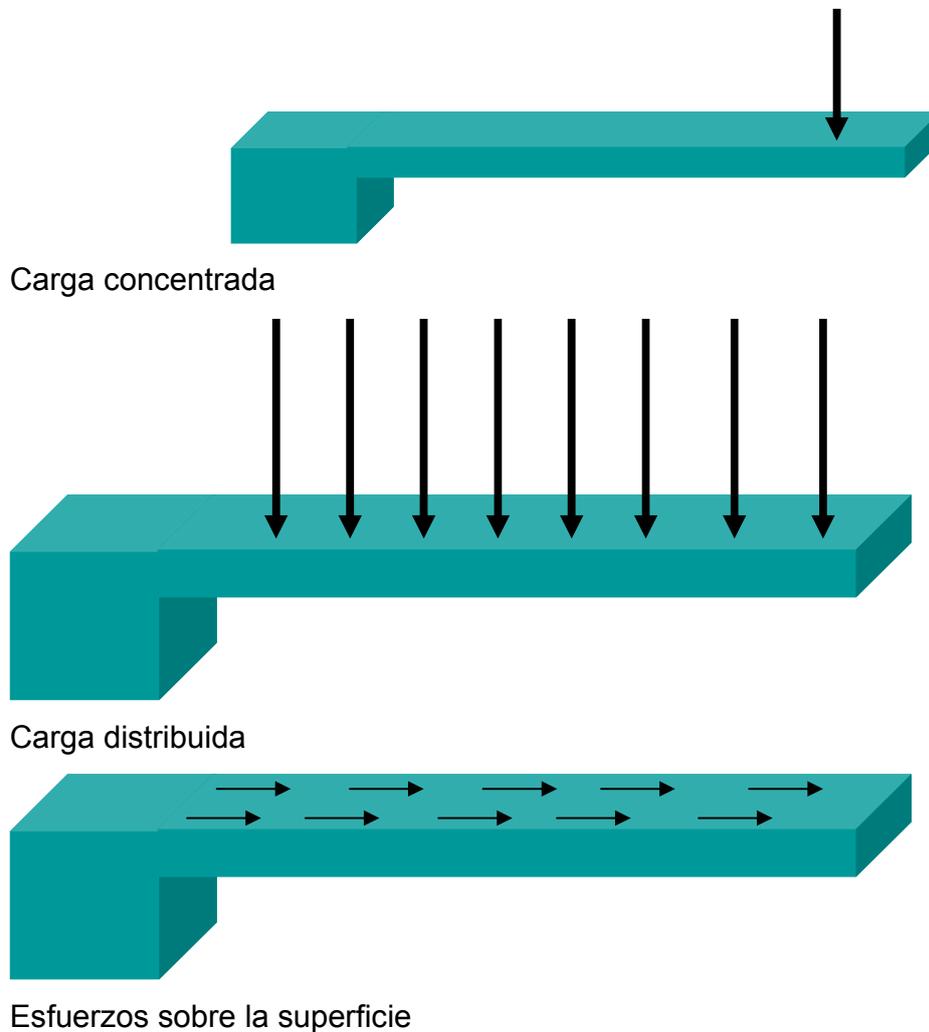
Los sensores basados en cantilevers se caracterizan por la gran simplicidad del elemento transductor, que son una o varias palancas de dimensiones micro/nano métricas obtenidas a partir de la micromecanización del silicio. Este tipo de sensores permiten detectar multitud de propiedades físicas y/o químicas: 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.

Existen dos modos de funcionamiento de los cantilevers. El primero de ellos es el modo estático o DC, de forma que la magnitud a detectar produce una deflexión del 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 elemento a medir, 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,...).

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

2.4.3 Propiedades mecánicas de los cantilevers

Las fuerzas que actúan sobre el cantilever pueden ser fuerzas distribuidas o concentradas o las provocadas por la magnitud a detectar (esfuerzos superficiales) y, en caso de tratarse de una palanca resonante, la fuerza de excitación.





Efecto resonante

2.4.4 Características de los sensores estáticos o DC

En el caso de los sensores que trabajan en modo estático o DC la magnitud a medir provoca una deflexión continua en la palanca. 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 el micro cantilever y sobre esta el analito, se produce un cambio en la masa y/o un estrés de la superficie que provoca la deflexión estática del microcantilever. Que es el caso de este trabajo.

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 el método se miden cambios en la capacidad formada por la palanca y otro electrodo separados por algún material (normalmente aire) debidos a variación de la distancia de separación entre los electrodos cuando la palanca 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 la palanca y detectar la luz reflejada por la palanca con un fotodetector. Es un método simple, utilizando por la mayoría de 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.
- c) **Piezoeléctrico.** Se trata de depositar una capa de material piezoeléctrico solidaria con la palanca 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) **Piezo-resistivo.** Se basa en la medida de las variaciones de resistencia que se producen en un material piezo-resistivo solidario con el cantilever cuando se somete al estrés producido por la deflexión. Este método es totalmente integrable con tecnología CMOS gracias a las excelentes propiedades piezo-resistivas 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. Método utilizado en este trabajo.

2.4.5 Características de los sensores Dinámicos o AC

El principio transductor de los sensores dinámicos se basa en la oscilación inducida externamente en el microcantilever, alcanzando el estado de resonancia.

La resolución alcanzable con los sensores dinámicos es considerablemente mayor (hasta 8 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 si se trata de sistemas estáticos.

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 cantilevers son:

- a) **Electromagnética.** La oscilación del cantilever se produce haciendo actuar sobre ella 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 en el cantilever y otra estructura denominada driver, está 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.
- c) **Electrotérmica.** Se coloca una capa de material muy resistivo sobre la superficie del microcantilever, se aplica entre el material y la palanca una tensión variable, que calienta el material depositado provocando una compresión/expansión de modo que provoca el movimiento deseado sobre la palanca.
- 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 la palanca a su estado resonante.

2.4.6 Técnicas de detección para cantilevers resonantes

Varias de las 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) **Capacitivo.** La señal de lectura es la corriente capacitiva formada por el sistema integrado del cantilever y su electrodo excitador, que podrá ser el sustrato o una estructura paralela a la palanca. 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 depositada 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 reflectada por el cantilever se mide el movimiento de aquel.
- d) **Piezo-resistiva.** El movimiento del cantilever se detecta a través del material piezoeléctrico depositado en el anclaje del cantilever, el material se

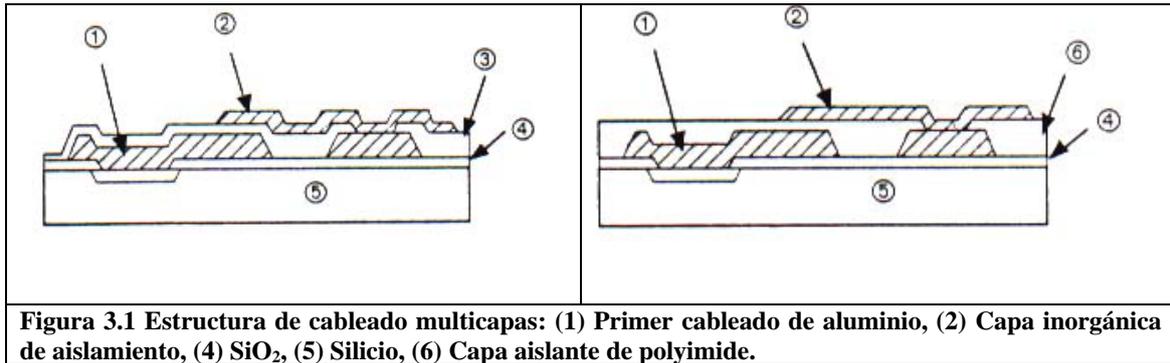
ha depositado en esta zona ya que es donde hay más sensibilidad. El material piezoeléctrico se deforma como consecuencia del movimiento del cantilever y proporciona una señal eléctrica proporcional a este movimiento.

- 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 la palanca.

3 Polímeros para microelectrónica

Los polímeros desempeñan un papel significativo en la microelectrónica. No sólo se encuentran dentro de los productos finales como cubiertas de los componentes, empaquetado de circuitos integrados y en las capas dieléctricas ínter metálicas, también se utilizan extensamente en los pasos importantes del proceso, por ejemplo, en micro litografía. La micro litografía con photoresist es un proceso esencial en la fabricación de la microelectrónica y los polímeros son esenciales para ello.

El dieléctrico más utilizado para el aislamiento es el dióxido de silicio (SiO_2) depositado por medio de PECVD (deposición de vapor químico realizada en plasma, por sus siglas en inglés). El aluminio y sus aleaciones se utilizan para formar capas conductoras. Como se puede ver en la Figura las películas inorgánicas finas con un grueso limitado a algunos μm o menos.



Un campo de investigación activo está trabajando en el reemplazo de la capa de aislamiento inorgánica SiO₂ con dieléctricos poliméricos. Entre los materiales orgánicos, las altas demandas en características térmicas y mecánicas, hasta el momento han sido resueltas lo mejor posible por los polyimides. Su alta resistencia eléctrica, constantes dieléctricas bajas y facilidad para el proceso de hacer polímeros orgánicos particularmente convenientes como capas de aislamiento en interconexiones de múltiples niveles. El Polyimide tiene otra ventaja importante, su alta estabilidad térmica.

3.1 Polyimide como capa sensible

El polyimide fue desarrollado originalmente para el uso en la industria electrónica como un dieléctrico de internivel, un buffer de esfuerzos, como capa pasiva y capa de partículas alfa. Los parámetros importantes del polyimide incluyen lo relacionado con la 'planarization', propiedades termomecánicas y eléctricas, tensión, adhesión, resistencia a solventes, larga estabilidad, exactitud y sensibilidad.

Se ha estudiado los polyimides para su uso como sensores de la humedad por varias razones:

- 1) Tiene alta estabilidad térmica a temperaturas mayores que 400 °C.
- 2) Son totalmente compatibles con tecnologías de proceso de silicio

- 3) **Tienen una alta sensibilidad a la humedad, su cambio dieléctrico esta cerca de los valores 3.0 a 4.2 como cambios en la humedad relativa a partir de 0% a 100%, absorben mucho más el agua que los óxidos de cerámica.**
- 4) **Su respuesta al cambio de la humedad es lineal, en contraste con los óxidos de cerámica.**
- 5) La constante de difusión es a menudo muy grande, conduciendo para ayudar al tiempo de reacción.
- 6) **Absorben el agua reversiblemente con poco o casi nada de histéresis.**
- 7) Tienen una buena resistencia a la corrosión química.

Generalmente los polyimides son insolubles. Pueden, sin embargo, ser aplicados al substrato como grueso de la capa relativamente alto.

Precursores de Polyimide solubles que poseen las características de photoresist proporcionan producciones más altas a un costo mas bajo debido a pocos pasos seguros en el proceso Figura 3.2 (Derecha). Pueden ser empleados fácilmente en foto-técnicas comunes.

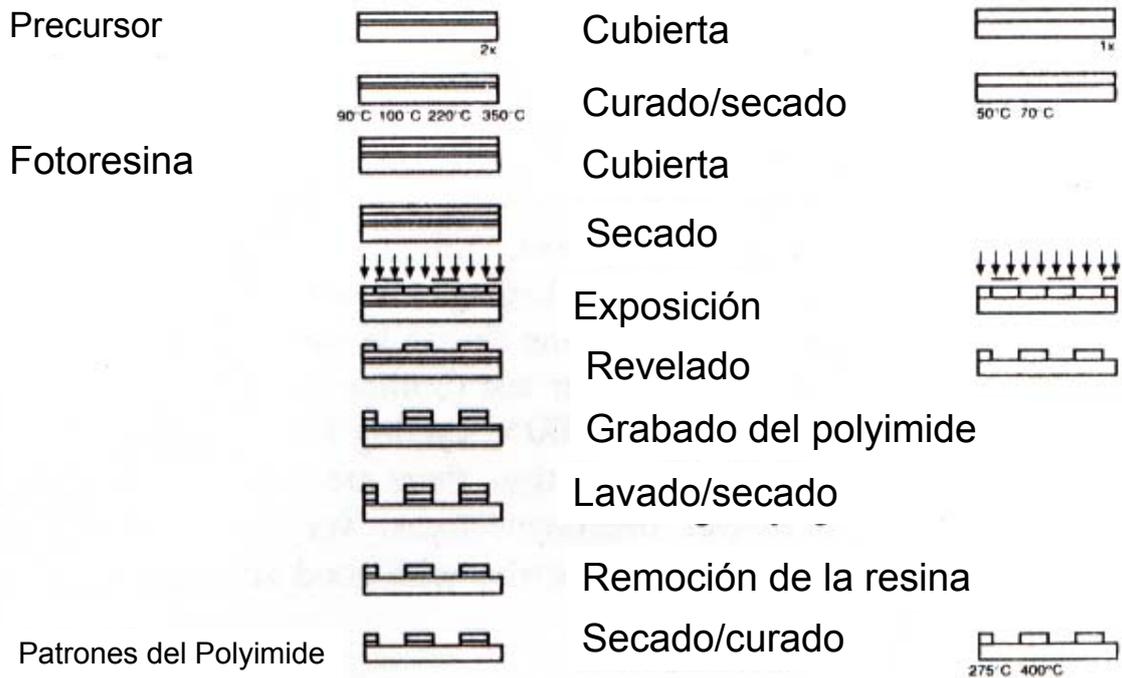


Figura 3.2 Modelado indirecto de los polyimides (izquierda) contra Modelado directo con el polyimide fotosensible (derecha)

Los Polyimides se pueden dividir en dos grupos:

- 1) No fotosensible
- 2) Fotosensibles

3.1.1 El polyimide no fotosensible

Se debe modelar con un grabado seco o mojado usando una capa foto-resistiva como mascara para requerir los pasos del proceso adicionales para hacer girar la capa y modelar el photoresist. Usando el polyimide foto-sensible se requiere apenas de dos pasos en el proceso: exposición a luz ultravioleta y el desarrollo. Puesto que el tipo fotosensible necesita considerablemente pocos pasos para el proceso que el tipo no-fotosensible, este tipo de polyimide se selecciona para el uso como capa sensible en un sensor de humedad.

3.1.2 Características de la adherencia

Los materiales de esfuerzo bajo con alargamiento alto son requisitos previos para evitar grietas. Por otra parte, la excelente adherencia del polyimide a los metales (y viceversa) y a la película de polyimide curado es muy importante también. Las dificultades se presentan en resolver ambas demandas, es decir, buenas características mecánicas y buena adherencia, puesto que los polyimides con la tensión baja de la demostración molecular rígida y lineal de la estructura pero tienen fuerzas adhesivas más débiles que las flexibles, que, alternadamente, tienen características mecánicas más pobres.

Tabla 3.1.3.1 Propiedades mecánicas y eléctricas de los polyimides foto sensibles disponibles comercialmente.

Material	Propiedades mecánicas		Modulo de elasticidad (GPa)	Esfuerzo (MPa)	Propiedades eléctricas		Actualización de agua (50%rh, 24 h RT)
	Fuerza de tensión (MPa)	Elongación (%)			Constante dielectrica (1 kHz)(0%rh)	Factor de pérdida (1 kHz)*10 ⁻³	
G-7621A ^a	>150	>30	3.3	40-50	3.3	3	0.8
TL-530A ^a	>200	>15	6	10-20	3	2	0.8
I-8320A ^a	>130	>50	2.8	40	3.4	2	0.8
MX-91C2 ^a	>140	>30	3.5	30	3.3	2	0.9
PI-2722 ^b	175	10	3.8	39.2	3.3	2	2.1
PI-2732 ^b	192	8	6	13.5	2.9	-	1.5
Prob. 7500 ^c	160	45	3.3	33	3.2 (1MHz)	3	1.1
Prob. 7000 ^c	166	48	2.97	30	3.2 (1 MHz)	4	1.25
UR 3800 ^d	145	30	3.4	-	3.3	2	1.1
UR 5100 ^d	200	>20	2.1	-	3.2	2	-
Prob. 400 ^c	147	56	2.9	48	2.9	6	2.5
Ultr. 7501 ^e	-	65	3.5	-	2.8	4	3.4

- a. Pimel/Asahi Chemical
- b. Pryalin/Du Pont
- c. Probimide/OGG
- d. Photoneece/Toray
- e. Ultradel/Amoco

Normalmente, la exposición de capas de polyimide para agua a temperaturas elevadas baja la adherencia de polyimides, porque el agua puede hidrolizar vínculos químicos entre el polyimide y la superficie del sustrato. Recientemente, las fuerzas adhesivas se han mejorado perceptiblemente. Las nuevas generaciones de polyimides han pasado la prueba de la cinta, incluso cuando las obleas cubiertas con el polyimide en una superficie del nitrato de silicio fueron hervidas en 121°C y 2 atmósferas para 400 horas (DuPont, 1994) y 500 horas.

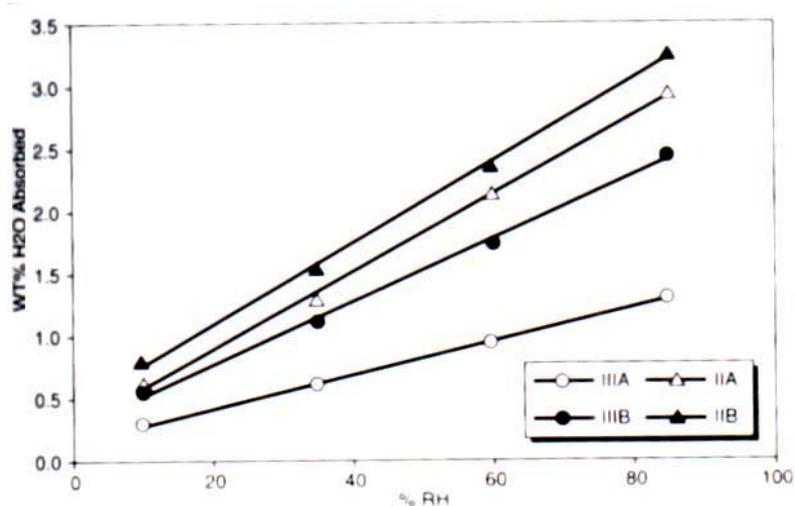


Figura 3.3 La absorción de agua de las películas de polyimide de (a) no sensible, (b) polyimide fotosensible precursor II y III como una función de la humedad relativa (% RH)

Tabla 3.1.3.2 Características Térmicas y Pattering para polyimides fotosensibles disponibles comercialmente

Material	Tipo	Dosis de exposición (mJ/cm ²)	Temperatura de curado (°C)	Pérdida de espesor (%)	Relación de aspecto (curado)	Tg (°C)	Espesor (curado)	CTE (ppm/°C)
G-7621A ^a	Ester	300	350-400	50	>0.7	355	5	40-50
TL-530A ^a	Ester	300	450	50	>1	-	5	10-20
I-8320A ^a	Ester	300	330-400	40	>0.7	280	5	50
MX-91C2 ^a	Ester	400	350-400	50	>0.8	-	10	35
PI-2722 ^b	Ester	300	350-400	50	0.5	>320	5	46
PI-2732 ^b	Ester	150-200	350-400	50	0.5	>400	5	13
Prob. 7500 ^c	Ester	100-180	350	40	0.6	285	5.7	55
Prob. 7000 ^c	Ester	150-220	350	40	>1	380	5.9	30
UR 3800 ^d	Sal	250	-	40-50	-	280	-	45
UR 5100 ^d	Sal	150-250	350-400	50-62	1	-	-	20
Prob. 400 ^c	Polyimide	600-700	350	5-9	0.7	357	5	37
Ultr. 7501 ^c	Polyimide	230	350	8	>1	>400	5	-

3.1.3 Absorción y transporte de la humedad en polyimides

La humedad absorbida en un material modifica muchas características físicas del material, incluyendo la constante dieléctrica, la conductividad, el módulo, la fuerza de impacto, la ductilidad, y la dureza. La constante dieléctrica es influenciada perceptiblemente por la absorción de la humedad puesto que el agua tiene una constante dieléctrica grande relativa de 80. La humedad se intercambia entre el material y el ambiente hasta que se alcanza un estado constante. En estado constante, el aumento neto y la pérdida de humedad se convierte en cero. El contenido de agua del equilibrio es una función de la humedad, de la temperatura, del tipo de material, y de la historia de la humedad del material.

El agua absorbida en un material existe en diversas formas: químico absorbida, físico absorbida, y condensación de estados. En el primer estado, las moléculas de agua químicamente están limitadas a los componentes del material; en el

segundo estado, son sostenidas por las fuerzas superficiales; y en el tercer estado, el agua se condensa dentro de los poros pequeños presentes dentro del material (el arracimar). El radio de los poros (r_k) debajo de que el agua condensa es dada por la ecuación

$$r_k = \frac{2\gamma M_n}{\rho RT \ln\left(\frac{p_s}{p}\right)} \dots(3.1.4.1)$$

Donde γ, M_n, R, T, p_s y p es la superficie de tensión, el peso molecular del agua, densidad, constante universal del gas, temperatura, presión de vapor saturado de agua, y presión de vapor de agua, respectivamente.

En polyimides, las moléculas de agua están limitadas químicamente a la matriz del polímero o condensadas en microvacíos, dependiendo del nivel de humedad. En la Figura 3.4 muestra las posibles vinculaciones entre moléculas de agua en polyimides.

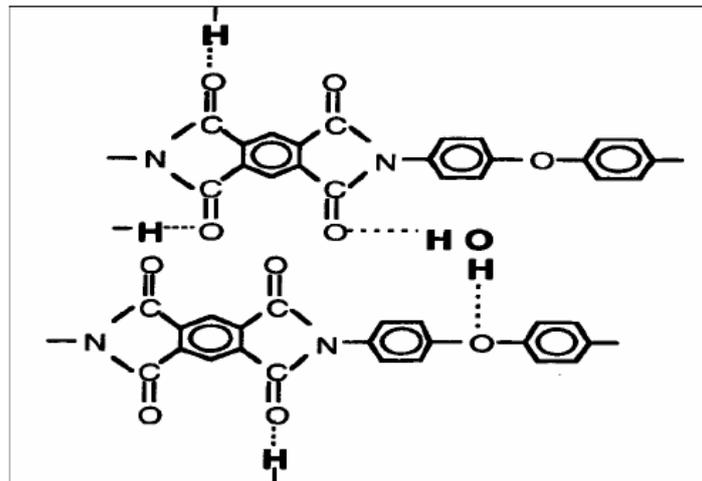


Figura 3.4 Posibles uniones de moléculas de agua en polyimide

4 Esfuerzo y deformación

El Silicio cristalino es un excelente material mecánico también como un excelente material electrónico. Las propiedades mecánicas del silicio son ideales en teoría en un rango alto de temperatura. Se ha especulado que las propiedades del silicio pueden cambiar cuando la geometría de la estructura mecánica esta a pequeña escala. Afortunadamente, sin embargo, no se observaron cambios significativos extremos en las estructuras mecánicas del silicio en escalas micrométricas.

4.1 Esfuerzo

De acuerdo a la teoría de la elasticidad, fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo en estado sólido producen esfuerzos internos y deformación. Si las fuerzas externas no exceden un cierto límite, la deformación desaparece una vez que las fuerzas se remueven. Para describir estas fuerzas, el tensor de esfuerzo es introducido. Matemáticamente, el esfuerzo es una segunda categoría de la tensión, que tiene nueve componentes como se muestra en la siguiente matriz

$$T = \begin{pmatrix} T_{XX} & T_{XY} & T_{XZ} \\ T_{YX} & T_{YY} & T_{YZ} \\ T_{ZX} & T_{ZY} & T_{ZZ} \end{pmatrix} \quad (4.1.1)$$

Donde las tres componentes de la diagonal son referidas al esfuerzo normal y las otras seis componentes son llamadas esfuerzo cortante.

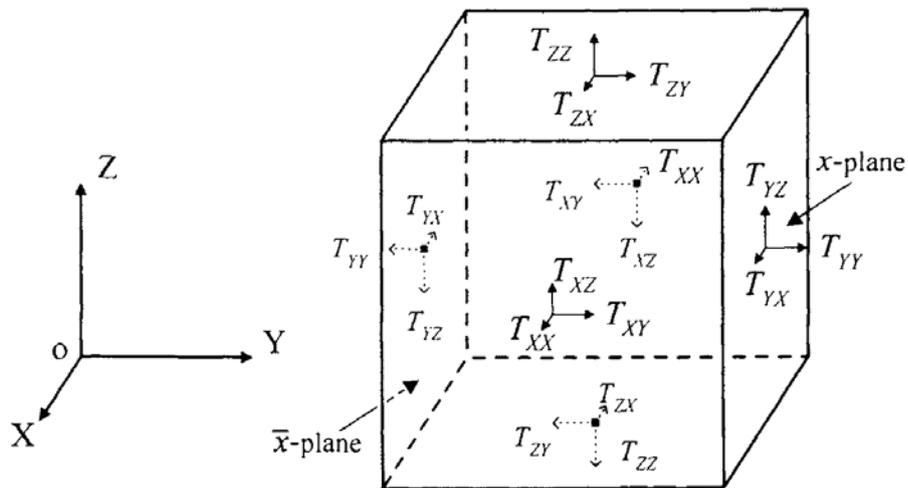


Figura 4.1.1 Componentes del tensor de esfuerzo.

4.2 Deformación

Con los esfuerzos, la deformación se produce dentro del material. Para un material en tercera dimensión, la deformación en el material es esquematizado en la Figura 4.2.1 Las componentes de desplazamiento para los puntos $r(x,y,z)$ son $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$ y $w(x,y,z)$ en las direcciones x -, y - y z -, respectivamente, y las componentes de desplazamiento para el punto $r'(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z)$ son $u+\Delta u$, $v+\Delta v$ y $w+\Delta w$, respectivamente. Las tres componentes son todas funciones de x , y y z .

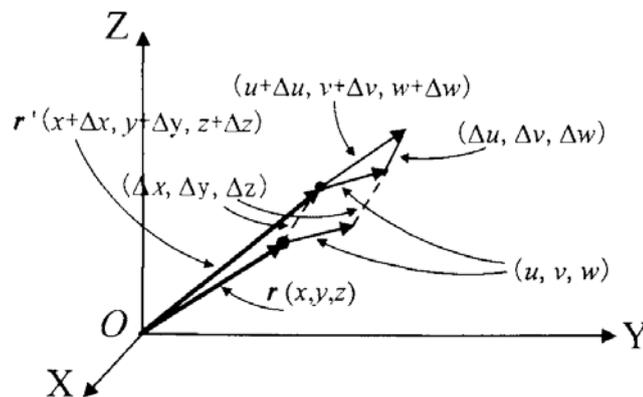


Figura 4.2.1 Deformación en un material en tres dimensiones

4.3 Esfuerzo y deformación en una estructura de viga.

4.3.1 Esfuerzo, Deformación en una viga deflexionada

Consideremos una viga recta con una sección transversal rectangular de ancho ' b ' y de espesor ' h '. La longitud de la viga ' L ' es mucho mayor que ' b ' y ' h '. En un sistema de coordenadas se toma como origen el centro de una sección transversal y el eje " x " a lo largo de la viga. El eje " z " esta en la dirección del espesor de la viga, como se muestra en la Figura 4.3.1.1 Si la viga esta flexionada en el plano xz

esta se levanta en ambos extremos debido al momento de flexión, M , como se muestra en la Figura 4.3.1.2, en la parte superior de la viga (el lado cóncavo) de la viga y se comprime en la parte inferior (el lado convexo) de la viga extiende. Hay un plano neutral en un punto intermedio que no esta ni estirado ni comprimido por la flexión. Es evidente que el plano neutral esta justo a la mitad de la viga rectangular.

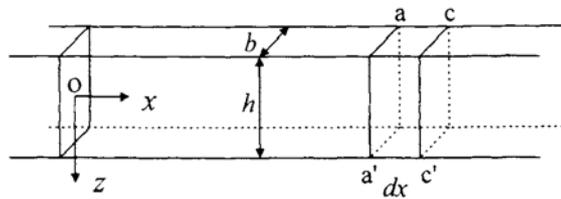


Figura 4.3.1.1 Un elemento de la sección de una viga.

Considerando una sección elemental, dx , de la viga entre dos planos verticales aa' y cc' . Generalmente, el desplazamiento de la viga en la dirección z , w , es una función de x , es decir $w=w(x)$, y la función se refiere al desplazamiento de la viga. Si el radio de curvatura de la sección elemental dx es $OO'=r$, como se muestra en la Figura 4, para una sección de capa horizontal en el plano central ($z=0$), tenemos $dx=r d\theta$.

Sin embargo, para una capa de la viga fuera del plano central ($z \neq 0$), el material es estirado o comprimido en la dirección x debido a la deformación de flexión. El alargamiento del material en la dirección x para la capa z es $\Delta(dx) = (r+z)d\theta - rd\theta = zd\theta$. El esfuerzo en la capa es la elongación relativa del material, por ejemplo:

$$\varepsilon(z) \frac{\Delta(dx)}{dx} = \frac{zd\theta}{rd\theta} = \frac{z}{r} \quad (4.3.1.1)$$

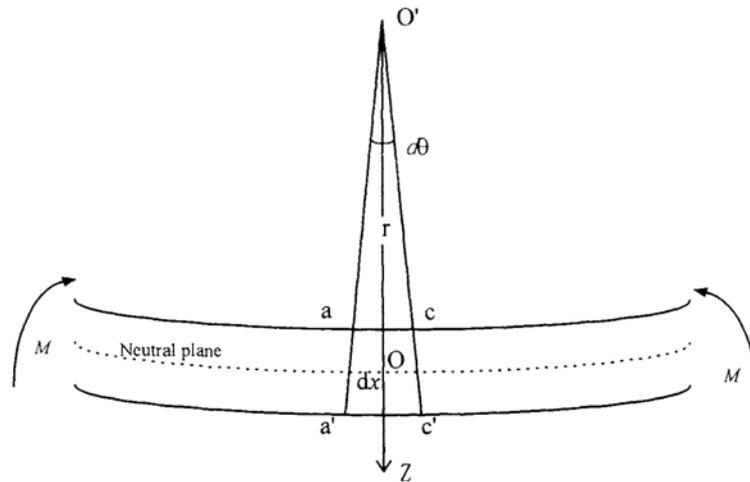


Figura 4.3.1.2 Flexión de una viga bajo un momento de flexión de la viga

De acuerdo con la Ley de Hooke, la tensión en el plano z es:

$$T_{xx}(z) = \frac{Ez}{r} \quad (4.3.1.2)$$

El signo de la tensión o estrés es positivo para la deformación por estiramiento y negativo en la compresión.

Cuando una viga se flexiona, el desplazamiento de su plano central es una función de la posición. Esto significa que $w=w(x)$, que es a menudo mencionada como una función de desplazamiento. En matemáticas, la reciprocidad del radio de curvatura $w(x)$ es el valor absoluto de la segunda derivada de $w(x)$, es decir,

$$\frac{1}{r} = |w''(x)| \quad (4.3.1.3)$$

De las ecuaciones (4.3.1.1) y (4.3.1.2), tenemos

$$|T(x, z)| = Ez|w''(x)| \quad (4.3.1.4)$$

Para la condición de flexión se muestra en la Figura 4.3.1.2, tenemos que $w''(x) < 0$. Para una capa con $z > 0$ en el elemento de la selección (por debajo del plano neutral), la capa es estirada, es decir $T > 0$, y viceversa. Por lo tanto, podemos establecer la relación algebraica para la ecuación (4.3.1.4)

$$T(x, z) = -E_z w''(x) \quad (4.3.1.5)$$

4.3.2 Flexión de viga compuesta por capas por una deformación residual

Para aplicaciones prácticas, las vigas de silicio son a menudo cubiertas con capas de película como dióxido de silicio, nitruro de silicio, resina, aluminio u otros materiales de aislamiento. Por ejemplo, el más usado es la estructura de viga de silicio con una capa de dióxido de silicio en la superficie. Como la película de dióxido de silicio se cultiva o deposita a una elevada temperatura y el coeficiente de expansión térmica de la película es diferente de la del silicio, la tensión interna o el estrés se desarrolla cuando el compuesto de la viga SiO_2/Si se enfría a temperatura ambiente. La tensión/estrés es a menudo mencionada como una tensión/estrés térmico o una tensión/estrés residual.

El esfuerzo residual causará que la viga se flexione o se ondule y el funcionamiento normal de la viga ya no es operativo. Por lo tanto, el efecto de la flexión residual de la viga debe de considerarse para los dispositivos MEMS. En primer lugar, las expresiones generales para un plano neutral y la curvatura de una viga con doble capa se derivan después de la línea con algunas modificaciones. Con estos resultados, se puede encontrar el estrés/esfuerzo térmico en la viga.

Como una aplicación de las ecuaciones, la ecuación de Stoney se refiere al esfuerzo/deformación en una película delgada en la curvatura de una viga. Finalmente, las respectivas expresiones para vigas múltiples capas se dan.

1) **Viga compuesta de capa doble**

Vamos a considerar en primer lugar la flexión en un cantiliver compuesto por SiO₂/Si como se muestra en la Figura 4.3.2.1, donde t_{ox} es el espesor del dióxido de silicio y t_{si} es el espesor del silicio, y el espesor de la viga se supone que es mucho más pequeño que el ancho y la longitud de la viga. Suponemos que el dióxido de silicio se cultivó a una elevada temperatura T'' y la longitud de la viga es L'' y ninguna tensión interna aparece en la viga a la temperatura.

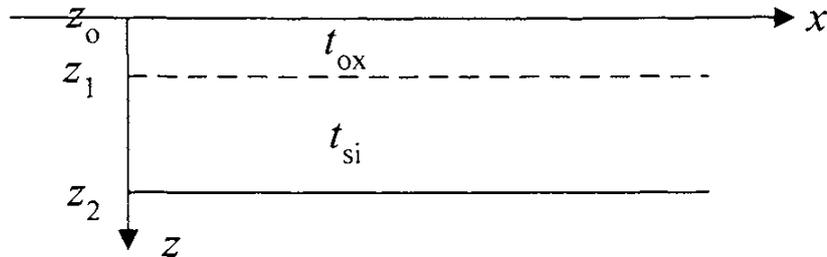


Figura 4.3.2.1 Viga de doble capa compuesta por SiO₂/Si

Si el dióxido de silicio y el silicio de la viga fueron separados y enfriados a la temperatura ambiente T , la longitud de la película del dióxido se convertiría en

$$L_{ox} = L'(1 - \alpha_{ox}\Delta T) \quad (4.3.2.1)$$

Donde $\Delta T = T'' - T$ y α_{ox} es el coeficiente de expansión térmica del dióxido de silicio. La longitud de la viga de silicio se convertirá en

$$L_{si} = L'(1 - \alpha_{si}\Delta T) \quad (4.3.2.2)$$

Donde α_{Si} es el coeficiente de expansión térmico del silicio. El dato comúnmente usado para los coeficientes de expansión térmica son los siguientes:

$$\alpha_{Ox} = 0.5 \times 10^{-6} / K \text{ y } \alpha_{Si} = 2.6 \times 10^{-6} / K$$

Como α_{Ox} es más pequeño que α_{Si} , el dióxido de silicio se comprime y el silicio se expande en la viga compuesta SiO₂/Si a temperatura T. Por lo tanto, la longitud resultante de la viga compuesta, L, estará entre L_{Si} y L_{Ox} es decir, $L_{Ox} > L > L_{Si}$.

Como $\alpha_{Ox}\Delta T$ y $\alpha_{Si}\Delta T$ es mucho menor que la unidad, el esfuerzo en la película de dióxido de silicio es

$$\varepsilon_{Ox} = \frac{L - L_{Ox}}{L} \cong \ln \frac{L}{L_{Ox}} \quad (4.3.2.3)$$

Similarmente, el esfuerzo en la capa de silicio es

$$\varepsilon_{Si} = \frac{L - L_{Si}}{L} \cong \ln \frac{L}{L_{Si}} \quad (4.3.2.4)$$

Como uno de los extremos de la viga esta libre, el total de la fuerza es cero. Por lo tanto, tenemos

$$E_{Si}t_{Si} \ln \frac{L}{L_{Si}} + E_{Ox}t_{Ox} \ln \frac{L}{L_{Ox}} = 0 \quad (4.3.2.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.3.2.1) y (4.3.2.2) en la ecuación (4.3.2.5), la longitud de la viga a temperatura T esta dada por

$$L = L'(1 - \alpha_{ef} \Delta T) \quad (4.3.2.6)$$

Donde α_{ef} es el coeficiente de expansión térmico efectivo de la viga compuesta

$$\alpha_{ef} = \frac{E_{Si}t_{Si}\alpha_{Si} + E_{Ox}t_{Ox}\alpha_{Ox}}{E_{Si}t_{Si} + E_{Ox}t_{Ox}} \quad (4.3.2.7)$$

Sin embargo, el total de fuerzas que actúan sobre la viga compuesta es nulo, este estado de esfuerzo no necesariamente cumple el momento de equilibrio. Como resultado general, el esfuerzo causado por la flexión, se añadirá para satisfacer el momento de equilibrio. Si la función de desplazamiento de la viga se designa como $w(x)$, el esfuerzo causado por la flexión es $-(z - z_0)w''(x)$, donde z_0 es la posición neutral del plano y $w''(x)$ la curva de la viga. En general, el efecto de flexión es de mucho más interés que el efecto del cambio en la longitud de la viga.

Cuando la tensión causada por la flexión se considera, esfuerzo en el dióxido de silicio esto es:

$$T_{Ox} = E_{Ox} \ln \frac{L}{L_{Ox}} - E_{Ox}(z - z_0)w''(z)$$

Y el estrés en el silicio es

$$T_{Si} = E_{Si} \ln \frac{L}{L_{Si}} - E_{Si}(z - z_0)w''(z)$$

La posición de plano neutral esta dado por

$$z_0 = \frac{E_{Ox}t_{Ox}(0 + z_1) + E_{Si}t_{Si}(z_1 + z_2)}{2(E_{Ox}t_{Ox} + E_{Si}t_{Si})}$$

O,

$$z_0 = \frac{E_{Ox}t_{Ox}(0 + t_{Ox}) + E_{Si}t_{Si}(2t_{Ox} + t_{Si})}{2(E_{Ox}t_{Ox} + E_{Si}t_{Si})} \quad (4.3.2.8)$$

La curvatura de la viga compuesta se puede encontrar mediante el uso de la condición del momento de equilibrio de la fuerza con el plano neutral

$$\int_0^{z_1} E_{Ox} \ln \frac{L}{L_{Ox}} (z - z_0) dz - E_{Ox} w'' \int_0^{z_1} (z - z_0)^2 dz + \int_{z_1}^{z_2} E_{Si} \ln \frac{L}{L_{Si}} (z - z_0) dz - E_{Si} w'' \int_{z_1}^{z_2} (z - z_0)^2 dz = 0$$

La expresión para la curvatura de la viga compuesta puede ser dada por

$$w''(x) = \frac{\int_0^{z_1} E_{Ox} \ln \frac{L}{L_{Ox}} (z - z_0) dz + \int_{z_1}^{z_2} E_{Si} \ln \frac{L}{L_{Si}} (z - z_0) dz}{E_{Ox} \int_0^{z_1} (z - z_0)^2 dz + E_{Si} \int_{z_1}^{z_2} (z - z_0)^2 dz} \quad (4.3.2.9)$$

De las ecuaciones (4.3.2.1), (4.3.2.2) y (4.3.2.6), tenemos $\ln(L/L_{Ox}) \cong (\alpha_{Ox} - \alpha_{ef})\Delta T = \varepsilon_{Ox}$ y $\ln(L/L_{Si}) \cong (\alpha_{Si} - \alpha_{ef})\Delta T = \varepsilon_{Si}$. Por lo tanto, la curvatura de la viga es

$$w''(x) = 3 \frac{E_{Ox} (\alpha_{Ox} - \alpha_{ef}) t_{Ox} \left(\frac{0 + z_1}{2} - z_0 \right) + E_{Si} (\alpha_{Si} - \alpha_{ef}) t_{Si} \left(\frac{z_1 + z_2}{2} - z_0 \right)}{E_{Ox} ((z_1 - z_0)^3 - (0 - z_0)^3) + E_{Si} ((z_2 - z_0)^3 - (z_1 - z_0)^3)} \Delta T \quad (4.3.2.10)$$

Con la ecuación (4.3.2.8) para z_0 y la ecuación (4.3.2.10) para $w''(x)$, el estrés y el esfuerzo en la viga puede ser dado.

Ahora vamos a considerar una situación encontrada comúnmente que es que la película de dióxido de silicio es mucho más fina que el sustrato de silicio ($t_{Si} \gg t_{Ox}$). En este caso, la posición del plano neutral puede ser aproximado como

$$z_0 = \frac{1}{2} t_{Si}$$

Sustituyendo este resultado en la ecuación (4.3.2.10), tenemos

$$w''(x) = 6 \frac{E_{Ox} \varepsilon_{Ox} t_{Ox}}{E_{Si} t_{Si}^2}$$

Por lo tanto, el esfuerzo residual del oxido es

$$\varepsilon_{Ox} = \frac{E_{Si} t_{Si}^2}{6 E_{Ox} t_{Ox}} w''(x)$$

O, el estrés residual en el oxido es

$$T_{Ox} = \frac{E_{Si} t_{Si}^2}{6 t_{Ox}} w''(x) \quad (4.3.2.11)$$

Esta es la bien conocida ecuación de Stoney, que es ampliamente utilizada para relacionar la flexión de la viga al estrés o la tensión en la película delgada.

2) *Viga compuesta por multi – capas*

La posición del plano neutro y la curvatura de la viga se pueden encontrar para una viga compuesta de n capas como se muestra en la Figura 4.3.2.2. La longitud de la viga a temperatura T es

$$L = L'(1 - \alpha_{ef} \Delta T)$$

Donde

$$\alpha_{ef} = \frac{E_1 t_1 \alpha_1 + E_2 t_2 \alpha_2 + \dots + E_n t_n \alpha_n}{E_1 t_1 + E_2 t_2 + \dots + E_n t_n}$$

Donde, E_i , t_i y α_i son el Modulo de Young, el espesor y el coeficiente térmico de expansión de las i capas respectivamente.

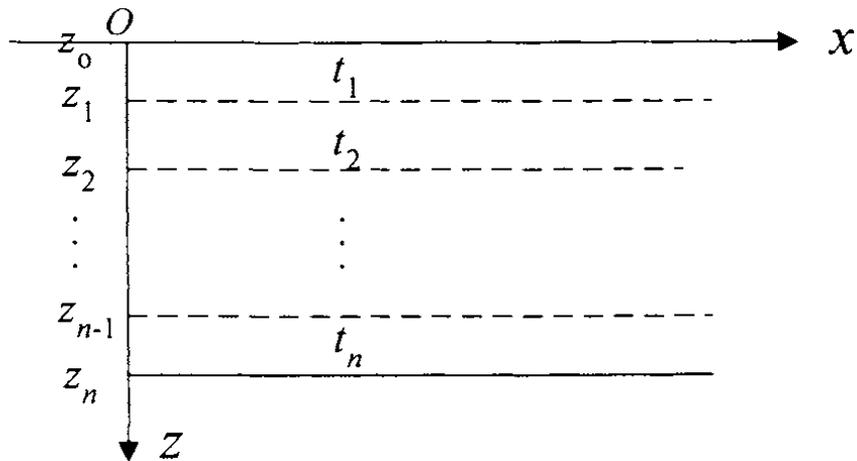


Figura 4.3.2.2 Viga compuesta por multicapas con n capas

La posición del plano neutral es

$$z_0 = \frac{E_1 t_1 (0 + z_1) + E_2 t_2 (z_1 + z_2) + \dots + E_n t_n (z_{n-1} + z_n)}{2(E_1 t_1 + E_2 t_2 + \dots + E_n t_n)} \quad (4.3.2.12)$$

Donde $z_i = \sum_{j=1}^i t_j$ ($i=1,2,3,\dots,n$), es decir, la posición de la parte inferior de las i vigas. La curvatura de la viga es

$$w'' = \frac{N}{D} \quad (4.3.2.13)$$

Donde

$$N = \int_0^{z_1} E_1 \ln\left(\frac{L}{L_1}\right) (z - z_0) dz + \int_{z_1}^{z_2} E_2 \ln\left(\frac{L}{L_2}\right) (z - z_0) dz + \dots + E_n \int_{z_{n-1}}^{z_n} \ln\left(\frac{L}{L_n}\right) (z - z_0) dz$$

$$D = E_1 \int_0^{z_1} (z - z_0)^2 dz + E_2 \int_{z_1}^{z_2} (z - z_0)^2 dz + \dots + E_n \int_{z_{n-1}}^{z_n} (z - z_0)^2 dz \quad (4.3.2.14)$$

5 Propuesta de diseño

La propuesta de diseño de esta tesis es diseñar un sensor de humedad basado en un microcantilever utilizando los conceptos y materiales vertidos en los capítulos anteriores. El fin de utilizar un microcantilever es que cuando este sensor este expuesto al medio ambiente, la humedad absorbida por la superficie activa (polyimide) haga que se flexione este y con el material piezoresistivo cambie su valor de resistencia y mediante un arreglo de Puente de Weastone se pueda medir esta diferencia de resistencia y así obtener una relación entre la flexión del microcantilever y la humedad relativa en el ambiente.

En la siguiente figura se muestra el prototipo del microcantilever que se pretende diseñar para el microsensar de humedad relativa.

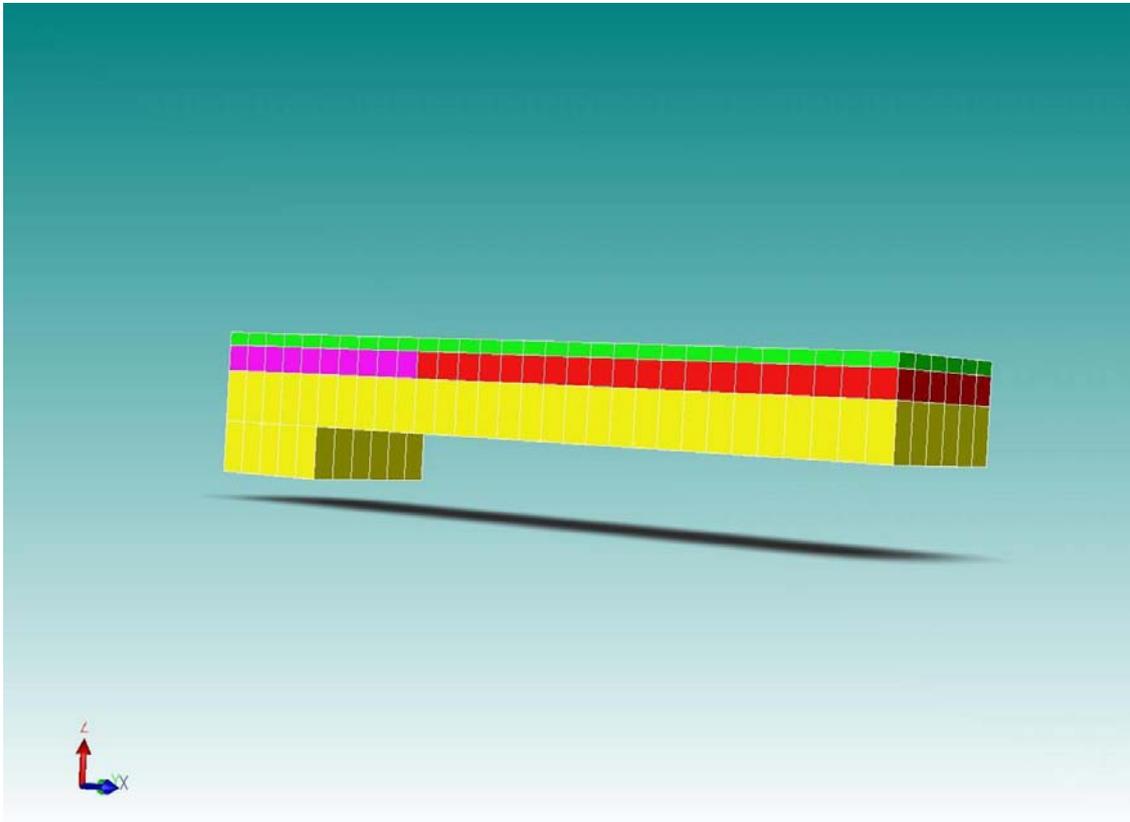
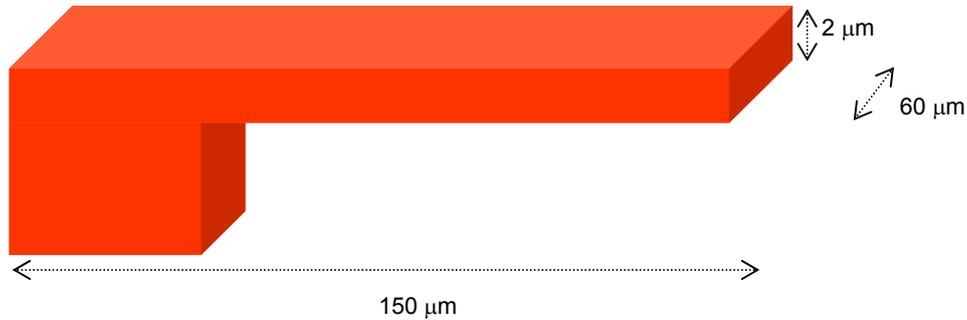


Figura 5.1 Microcantiliver

Donde los materiales utilizados son:

	Polisilicio
	Silicio
	Polisilicio
	Polyimide

Un diagrama esquemático de la estructura del microcantilever con cubierta de Polyimide se muestra en la figura. Las dimensiones del microcantilever diseñado son 150 μm , 60 μm de ancho y 2 μm de espesor.



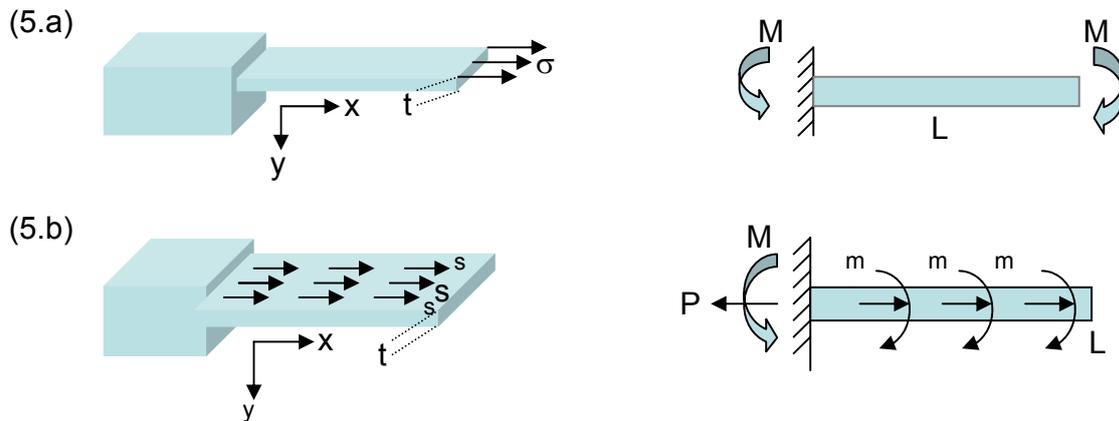
En algunos casos, la absorción inducida causa una flexión en el cantilever que puede ser predicha por el modelo que se muestra en la Figura (5.a), en el que la punta tiene una carga distribuida uniformemente, σ . La unidad de σ es N/m, y $\sigma > 0$ es la resistencia a la tracción. Un momento concentrado M aplicado al cantilever puede representar a este efecto de estrés en la superficie. Por lo tanto, el radio de curvatura R del microcantilever puede ser derivado como

$$\frac{1}{R} = \frac{6\Delta\sigma(1-\nu)}{Et^2} \dots (5.1)$$

Donde, E y ν representan el Modulo de Young y el Radio de Poisson, respectivamente. T representa el espesor del cantilever. $\Delta\sigma$ Representa la diferencia de estrés en la superficie, y $\Delta\sigma = \sigma^+ - \sigma^-$, σ^+ y σ^- son el estrés en la superficie en la parte superior e inferior del cantilever, respectivamente.

De hecho la ecuación (5.1) es la famosa fórmula de Stoney. En términos del radio de curvatura R , la deflexión al final del cantilever se puede expresar como

$$y_{\max} = \frac{L^2}{2R} = \frac{3L^2(1-\nu)}{Et^2} \Delta\sigma \dots (5.2)$$



Aunque la fórmula de Stoney sirve como piedra angular para el análisis y la curvatura de la base de una técnica para la medición del estrés en la superficie, no está de acuerdo con el experimento de las estructuras de los datos en virtud de la gran deformación de la película/recubrimiento sobre el sustrato. Además, el modelo anterior respecto a la superficie como un momento de estrés aplicado al cantilever no tiene en cuenta la influencia de la superficie de rigidez en la estructura. Así, Zhang proporcionó un nuevo modelo que se muestra en la Figura 5.b. Este modelo supone una zona de esfuerzos distribuidos de manera uniforme sobre la superficie superior del cantilever. Se trata de un modelo distribuido de manera uniforme axial s_w a lo largo de la viga del eje neutro y a lo largo de los momentos de flexión m a lo largo del cantilever. En términos de esto, derivando la ecuación que rige como

$$E * I \frac{d^4 y}{dx^4} - s_w(L - x) \frac{d^2 y}{dx^2} + s_w \frac{dy}{dx} = 0 \dots(5.3)$$

Y las condiciones de frontera son

$$y(x)|_{x=0} = 0$$

$$\frac{dy}{dx}|_{x=0} = 0$$

$$\frac{d^2y}{dx^2}|_{x=L} = 0$$

$$E * I \frac{d^3y}{dx^3}|_{x=L} + m = 0$$

Este segundo modelo puede resolver los problemas, que el primer modelo no puede explicar.

6 Simulación mediante el Modelo de Elemento Finito

Este diseño fue construido y simulado en CoventorWare usando el método de elemento finito para calcular la deformación mecánica inducida por el esfuerzo producido en la superficie del microcantilever debido a la absorción de humedad de la capa activa de polyimide que se encuentra en la superficie del cantilever

Cuando aplicamos las condiciones frontera en el mallado del modelo, dividimos la carga de la fuerza aplicada sobre la superficie del cantilever sobre cada elemento, lo que es equivalente a la condición descrita en el segundo modelo mencionado.

Si el cantilever es hecho de Polyimide, el modulo de Young $E=7.5 \text{ GPa}$, el radio de Poisson $\nu=0.35$,

6.1 Simulación en Coventor

El diseño y simulación de este dispositivo se realizó en el programa COVENTOR, que es el programa de diseño que se encuentra en el Centro de Diseño UNAMems de la Facultad de Ingeniería.

Para empezar el diseño debemos de seleccionar los materiales, diseñar el proceso, diseñar las mascararas que se van a utilizar para el atacado y visualización del modelo en 3D. En la Figura 6.1 se muestra la primera ventana para empezar el diseño

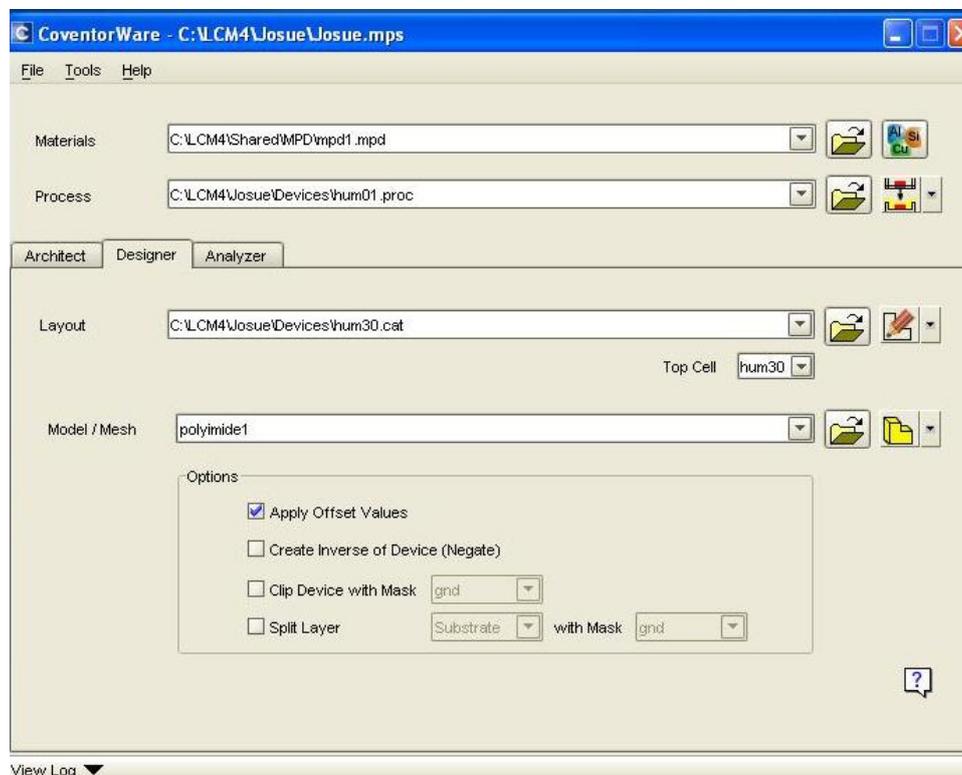


Figura 6.1 Ventana de diseño

La Figura 6.2 es la ventana donde se agregan los materiales utilizados, así como, el nombre de las capas, el espesor de la capa, el nombre de la mascara y el tipo de ataque se va a utilizar para cada material, seleccionamos el botón  para realizar dicha acción.

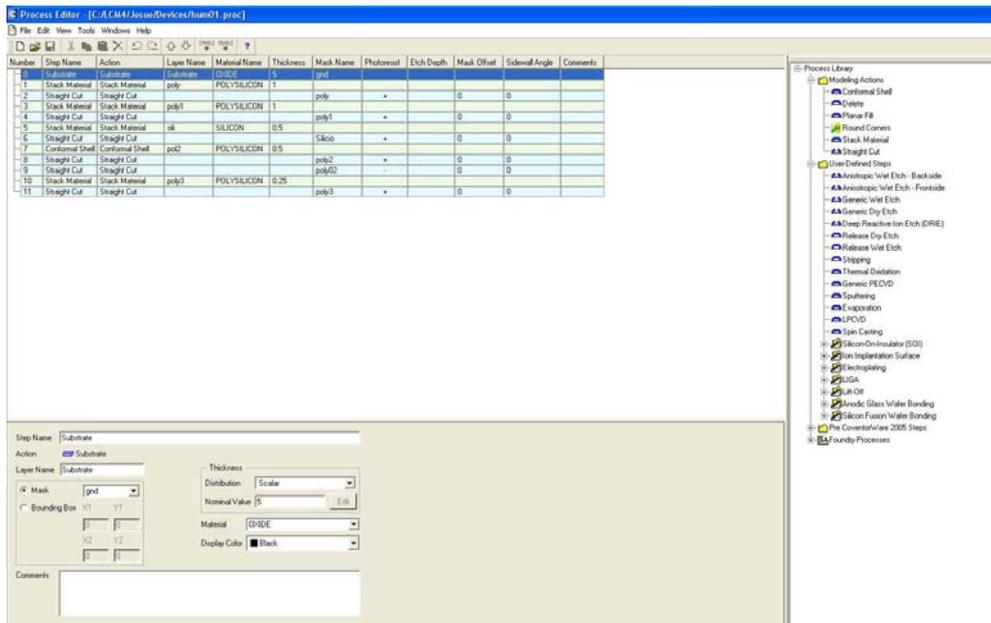


Figura 6.2 Ventana de los diferentes tipos de materiales a utilizar

Ya que se tienen los materiales a utilizar, así como sus características necesarias para nuestro diseño, el siguiente paso es hacer el Layout para las mascaras y el tipo de diseño que pretendemos realizar, por lo que seleccionamos la opción para hacer el layout . Para este trabajo, necesitamos hacer un microcantilever con la particularidad que en las capas intermedias lleva dos materiales distintos. Ver Figura 6.3

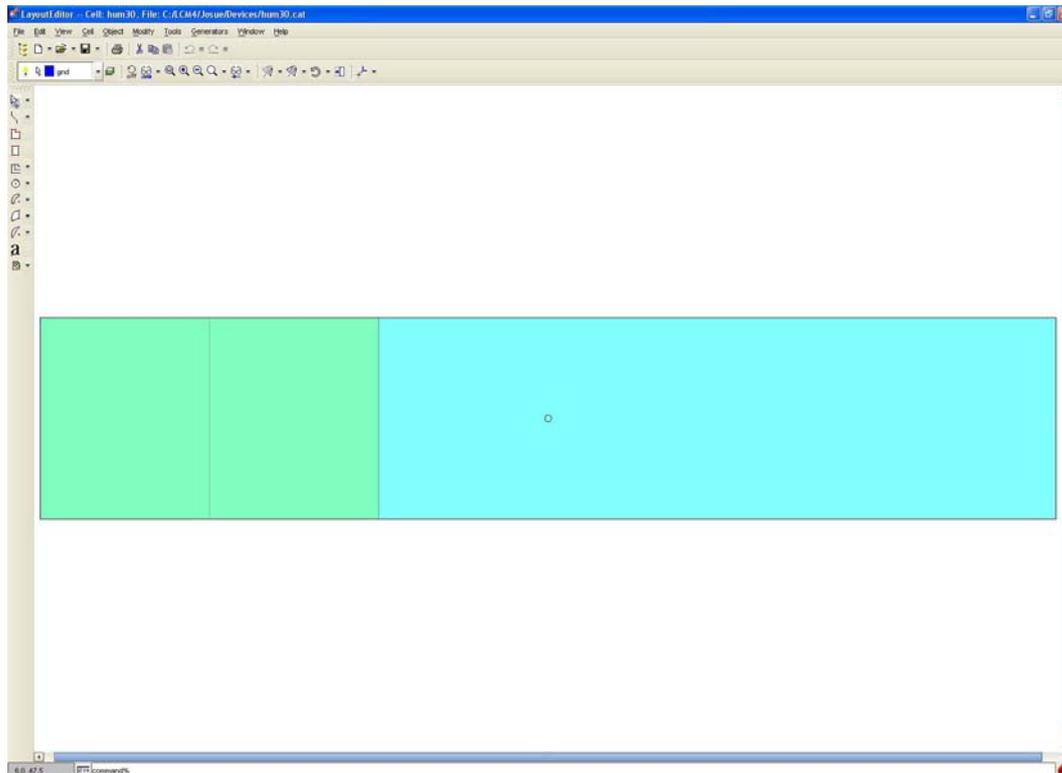


Figura 6.3 Layout del microcantilever

El siguiente paso es hacer el modelo de microcantilever en 3D, en la opción de Model/Mesh  en el cual mediante el dibujo del layout y las propiedades que le dimos a los distintos materiales es como se forma el modelo en 3D. Ver Figura 6.4. A partir de que se tiene el modelo en 3D, se empieza a hacer el mallado de este para poder hacer el análisis y simulación del dispositivo diseñado.

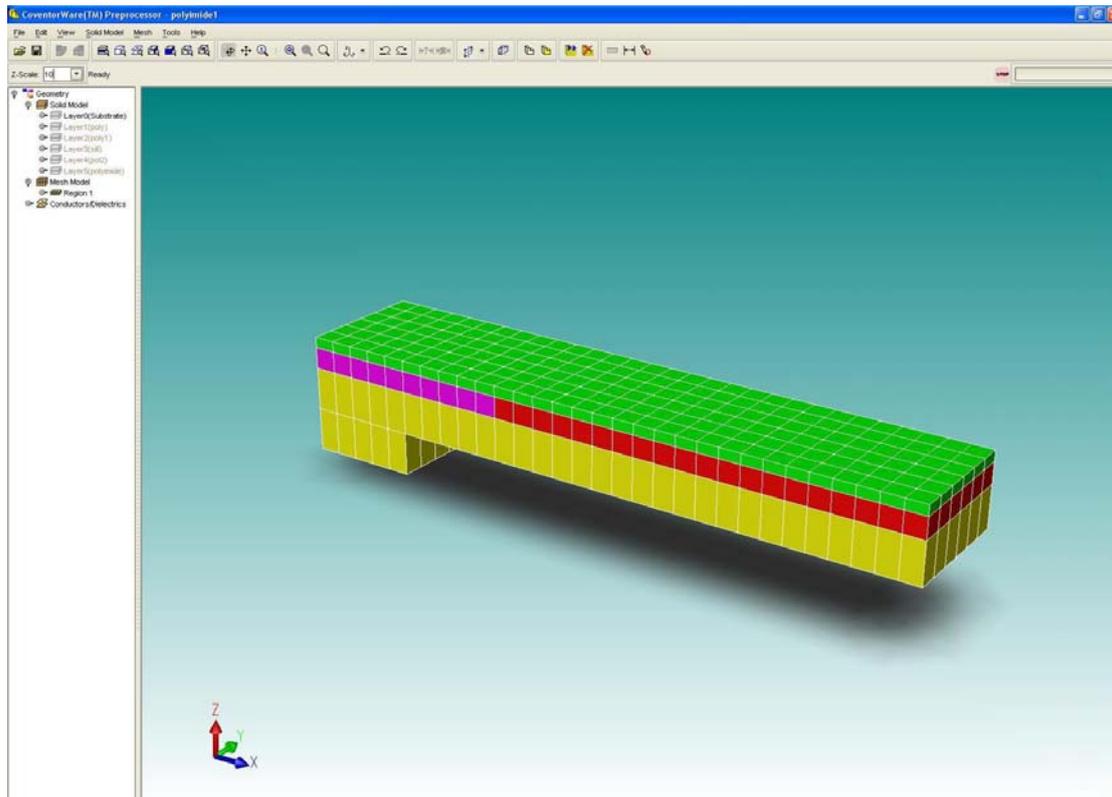


Figura 6.4 Vista del modelo 3D del microcantilever con mallado Manhattan bricks

Se utilizó un mallado del tipo Manhattan Bricks para la viga con dimensiones de: $4 \times 4 \times 4 \mu\text{m}$. Además en este proceso de mallado se asignan nombres a las diferentes caras del microcantilever las cuales se utilizarán para la simulación.

Una vez hecho el mallado y la asignación de nombres a las caras del microcantilever, se procede a hacer el análisis de dispositivo. Para ello se abre la ventana de análisis del programa COVENTOR para realizar el análisis correspondiente y fijar los parámetros que se requieren para realizar dicho análisis. Ver Figura 6.5.

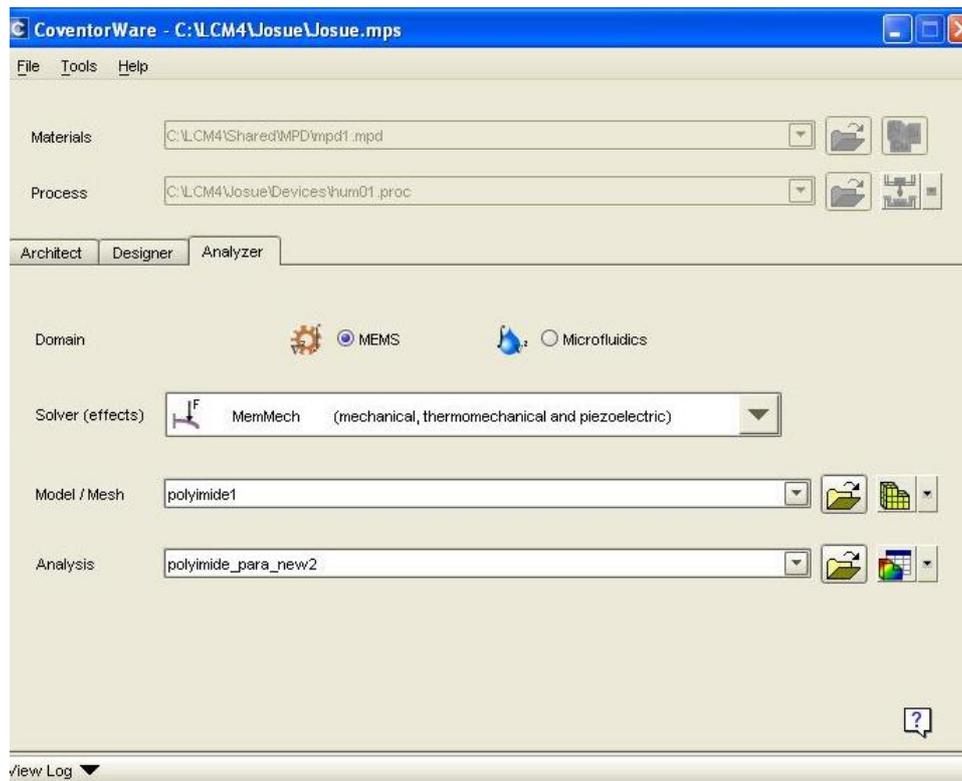


Figura 6.5 Ventana de análisis

El tipo de análisis que empleamos fue el de MemMesh, Mecánico, ya que se requiere de una fuerza a lo largo de superficie para simular la humedad absorbida por el polyimide de la cual se habló con anterioridad. Ver Figura 6.6.

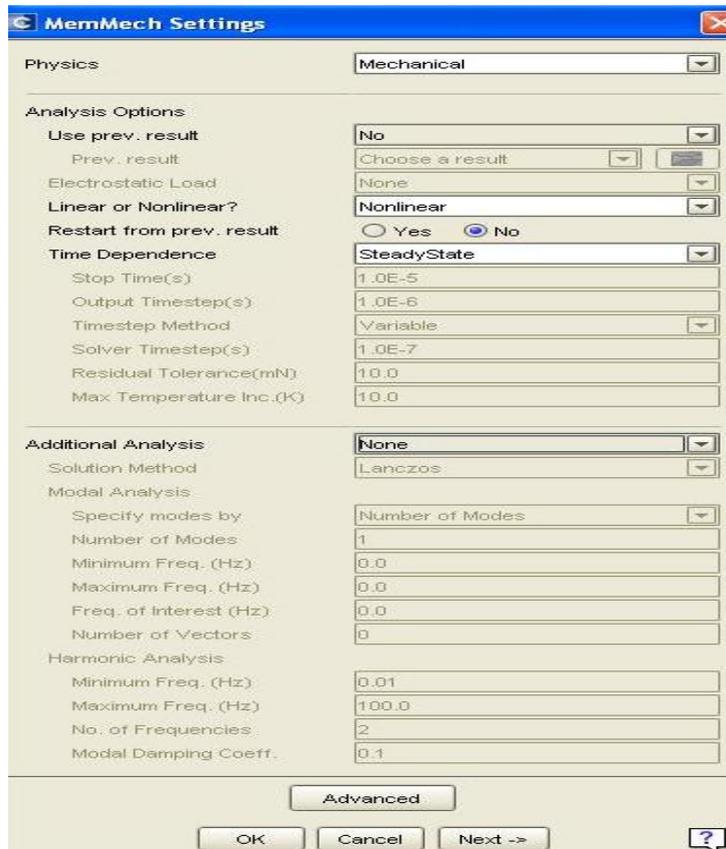


Figura 6.6 Vista de MemMech

En seguida, se despliega la ventana de MemMech BCs. Ver Figura 6.7



Figura 6.7 Ventana de MemMech BCs

Mediante la selección de SurfaceBCs aparece otra ventana donde podemos definir las caras que quedan fijas y cuales otras donde se va a aplicar la fuerza así como el valor de ella. Ver Figura 6.8.

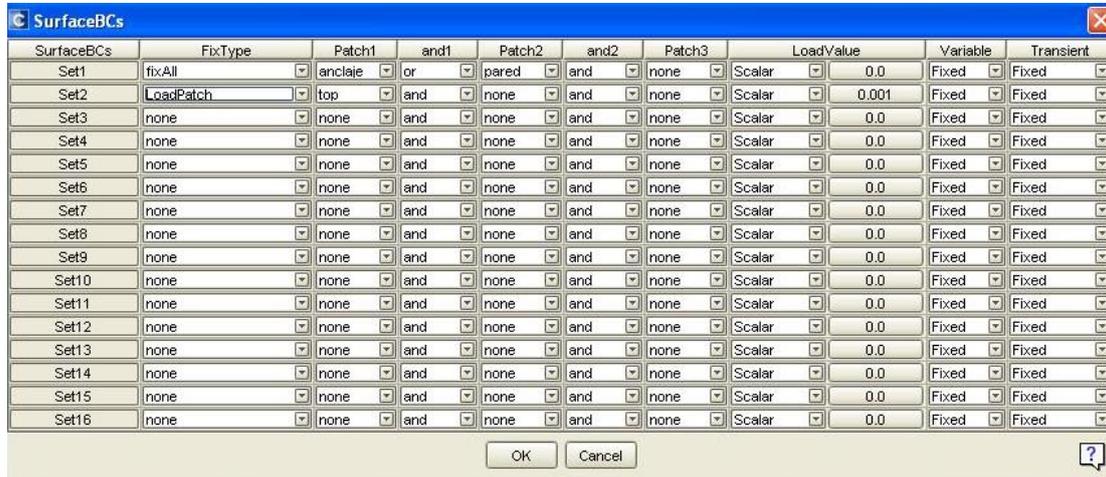


Figura 6.8 Ventana de SurfaceBCs

Después de haber puesto la condición frontera para la simulación del diseño, seleccionamos el botón de Estudio Paramétrico. Ahora se selecciona el botón de Trayectorias, se despliega una ventana donde se ingresan los datos de la delta. Ver Figura 6.9.



Figura 6.9 Ventana de Estudio Paramétrico

En este caso empezamos desde el valor de 0.001 MPa con una delta de 0.001 y termino en 0.1 MPa para un total de 100 pasos. Ver Figura 6.10.

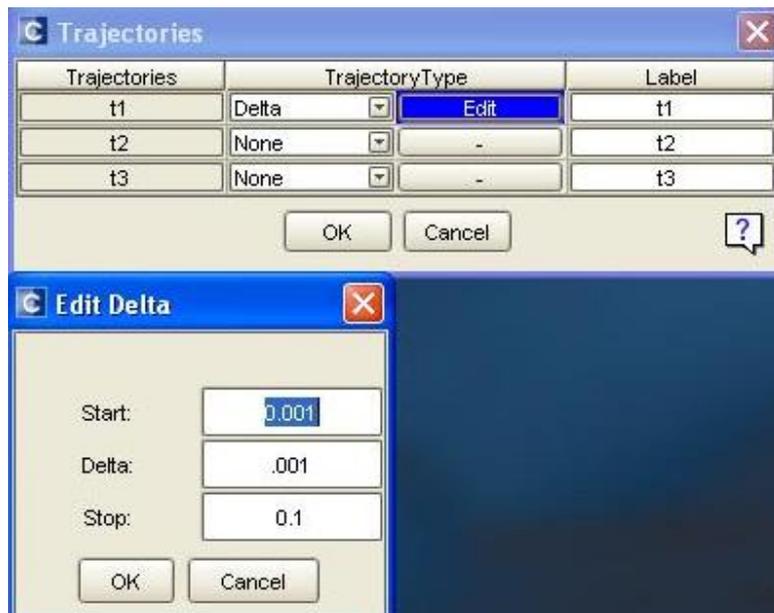


Figura 6.10 Ventana de Trayectoria

Después de poner los parámetros de la trayectoria, se procede a salvar el análisis, que se hace en la ventana de la Figura 6.11, donde asignamos un nombre a nuestro análisis.

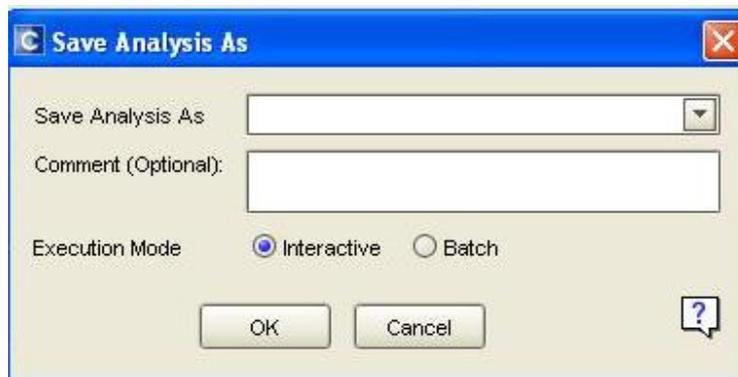


Figura 6.11 Ventana para asignar nombre al análisis

Una vez asignado un nombre al análisis se da clic en OK y el programa empieza a analizar nuestro modelo. Una vez terminada la simulación inmediatamente se despliega una pantalla donde podemos ver los resultados tanto numéricos como gráficos (en 2D y 3D). Ver Figura 6.12.

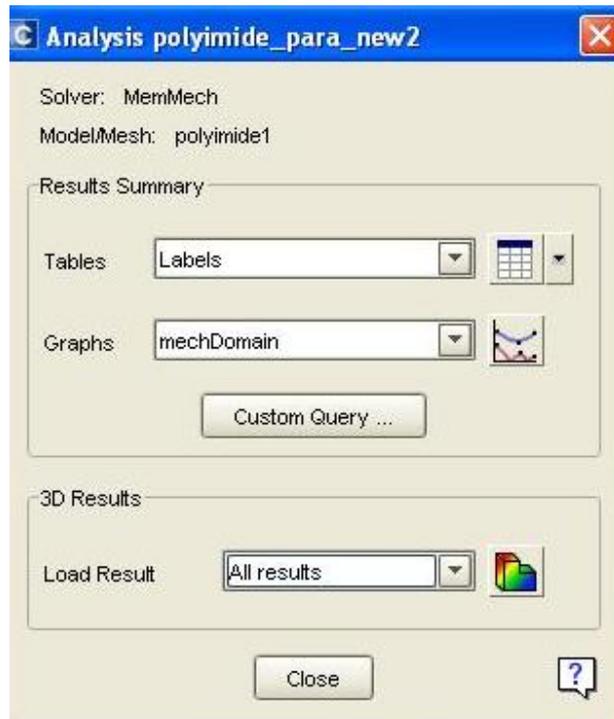


Figura 6.12 Ventana de resultados de la simulación

Para nuestro interés esta que el microcantilever tenga movimiento y a partir de ahí mediante la deflexión de los materiales, el material piezoresistivo cambiará su valor de resistencia, por lo tanto, podemos medir el valor de la humedad con nuestro dispositivos diseñado.

En seguida se muestran unas imágenes con distintos valores de fuerza aplicados a lo largo de la superficie del microcantilever.

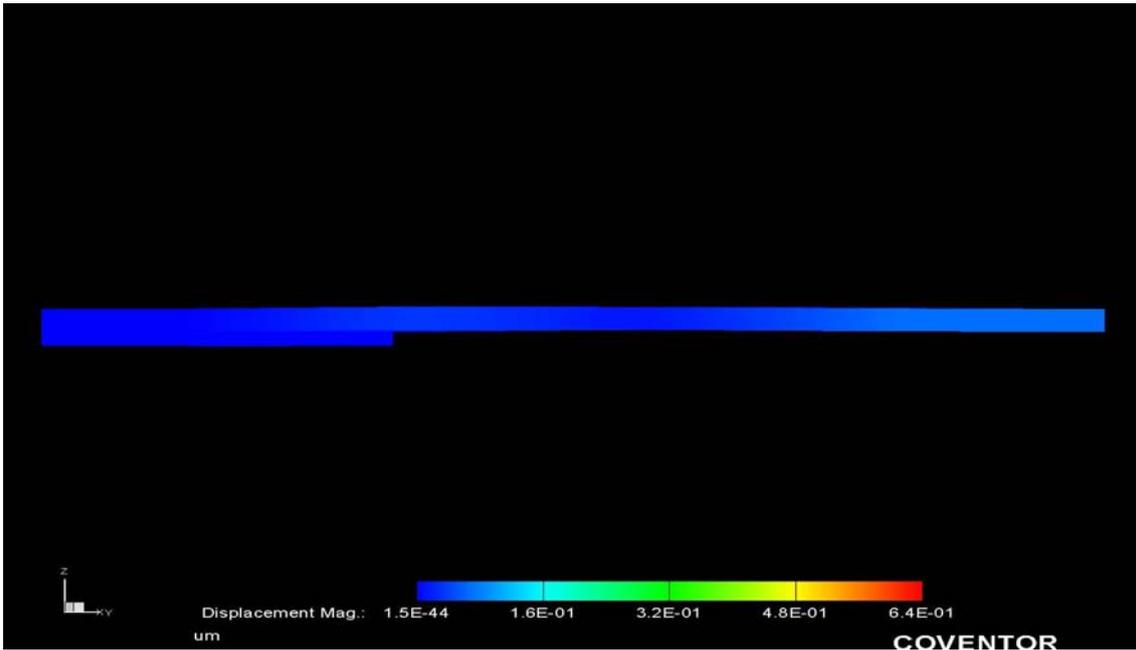


Ilustración 6-1 Desplazamiento para 0.001 MPa

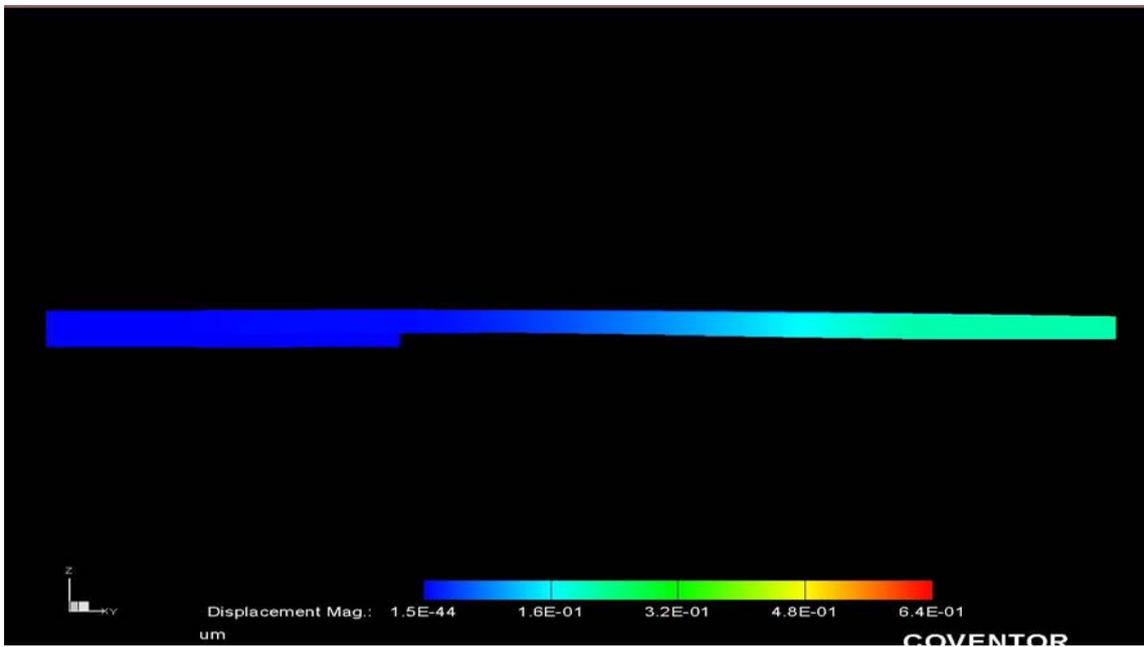


Ilustración 6-2 Desplazamiento para 0.025 MPa

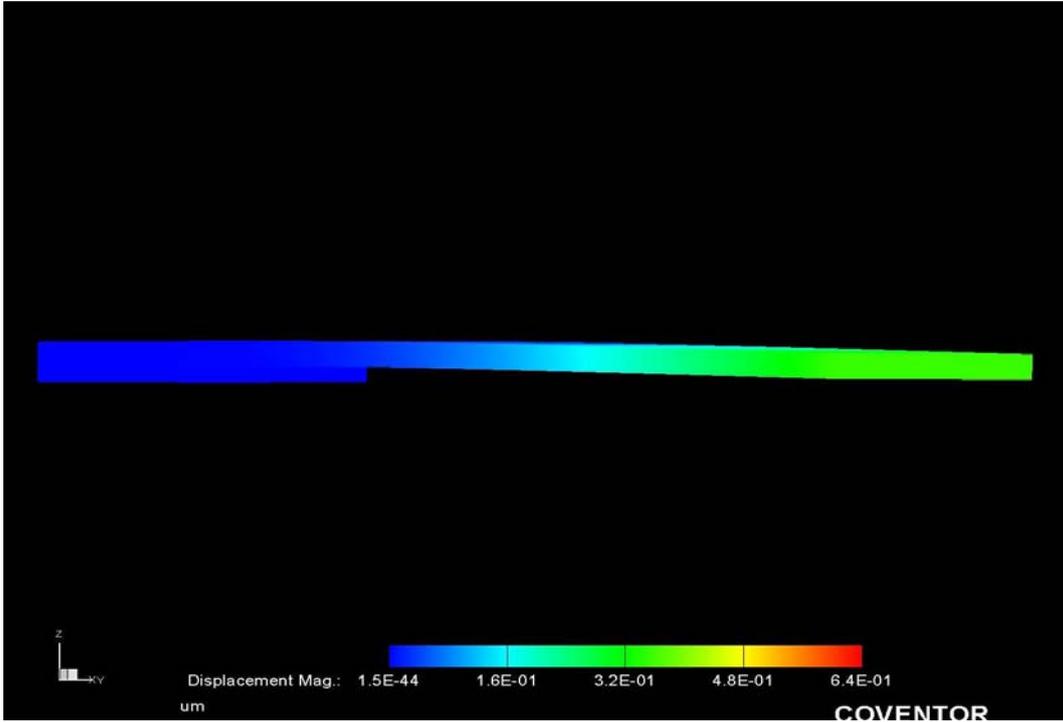


Ilustración 6-3 Desplazamiento para 0.050 MPa

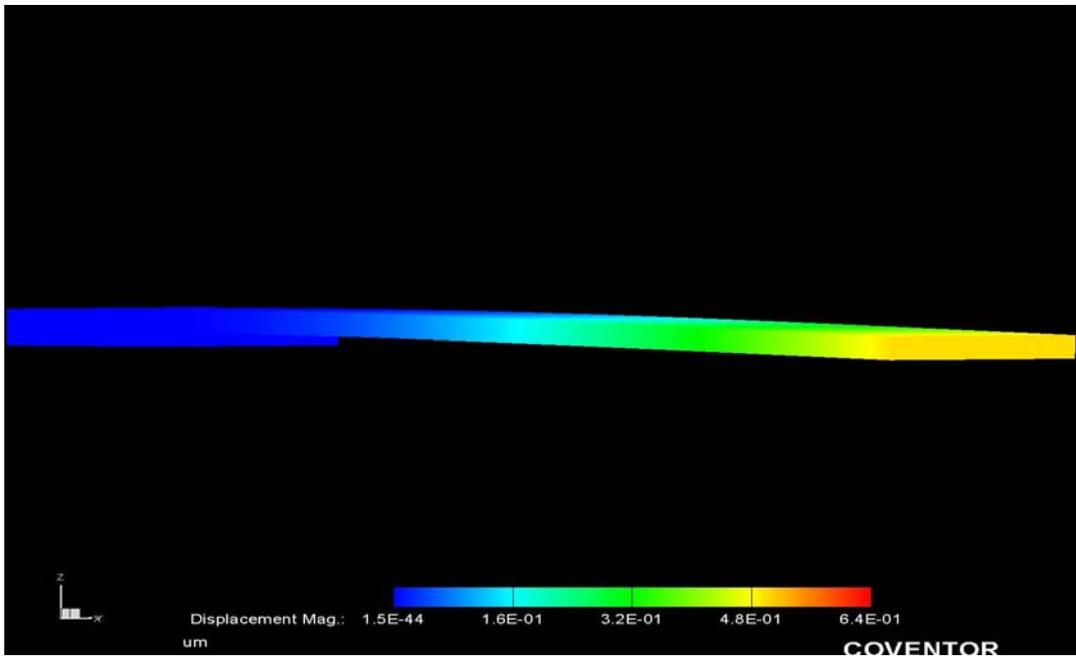


Ilustración 6-4 Desplazamiento para 0.075 MPa

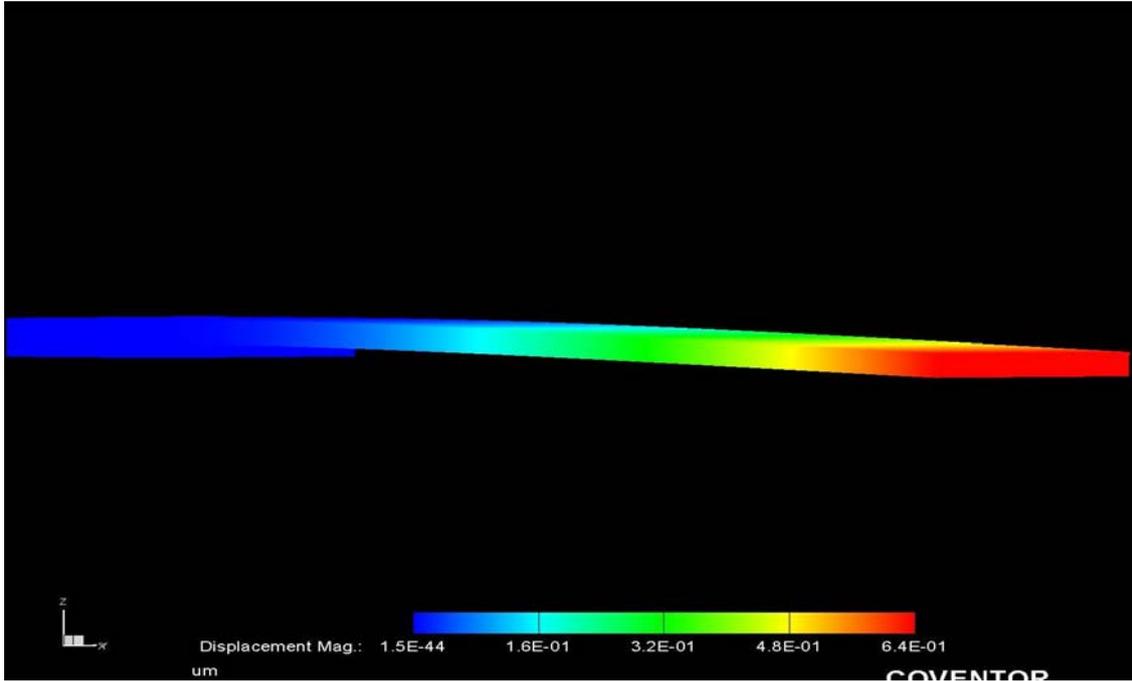


Ilustración 6-5 Desplazamiento para 0.1 MPa

Como se vio en las imágenes, el microcantilever si se reflexionó, ahora se presenta otras imágenes del esfuerzo sobre el microcantilever.

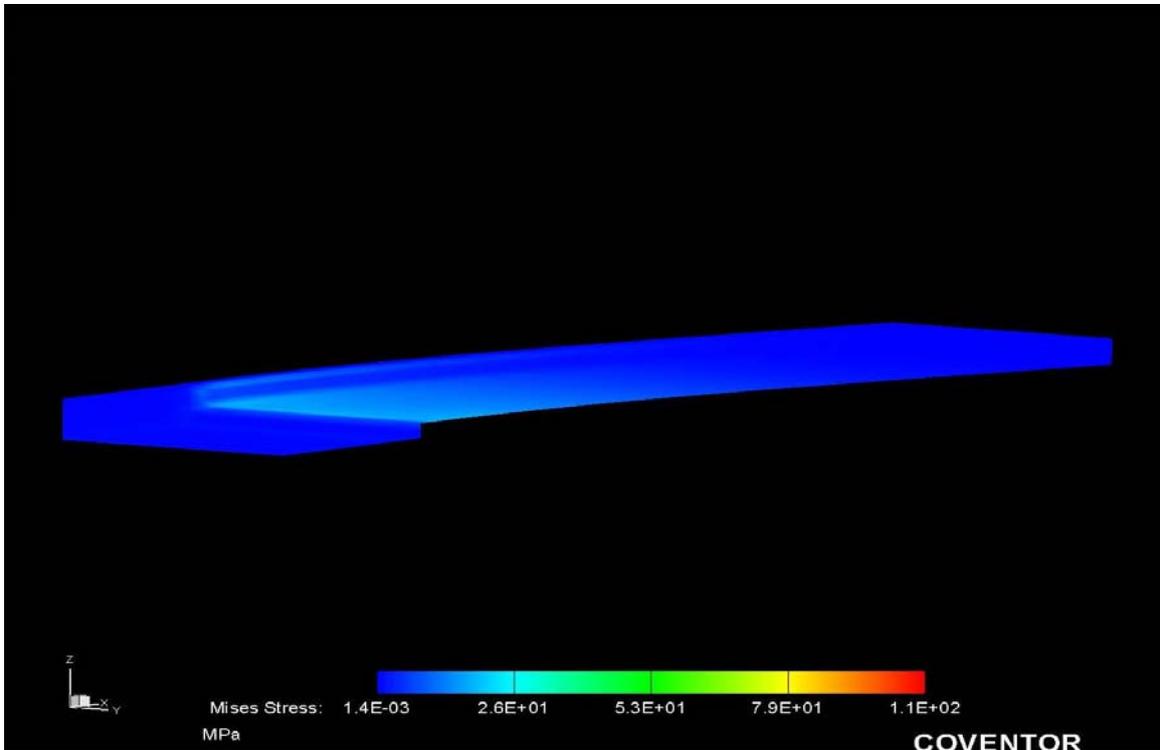


Ilustración 6-6 Distribución de Esfuerzos para una carga 0.001 MPa

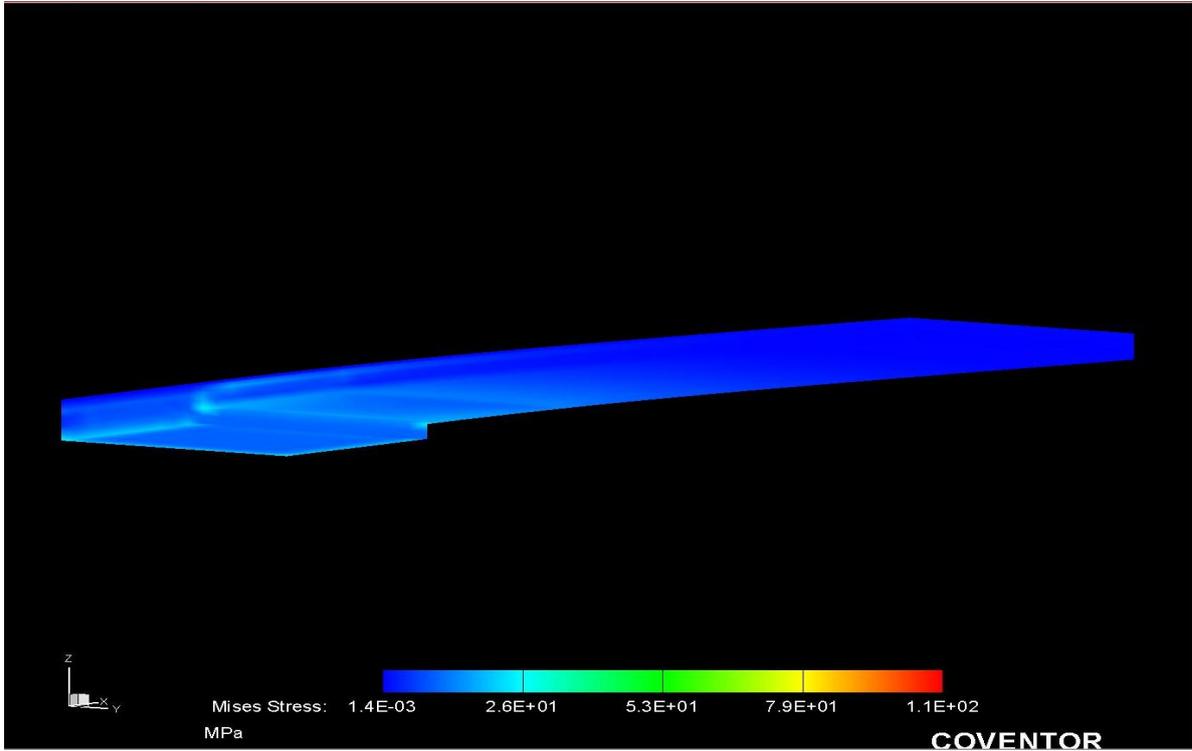


Ilustración 6-7 Distribución de esfuerzos para una carga de 0.025 MPa

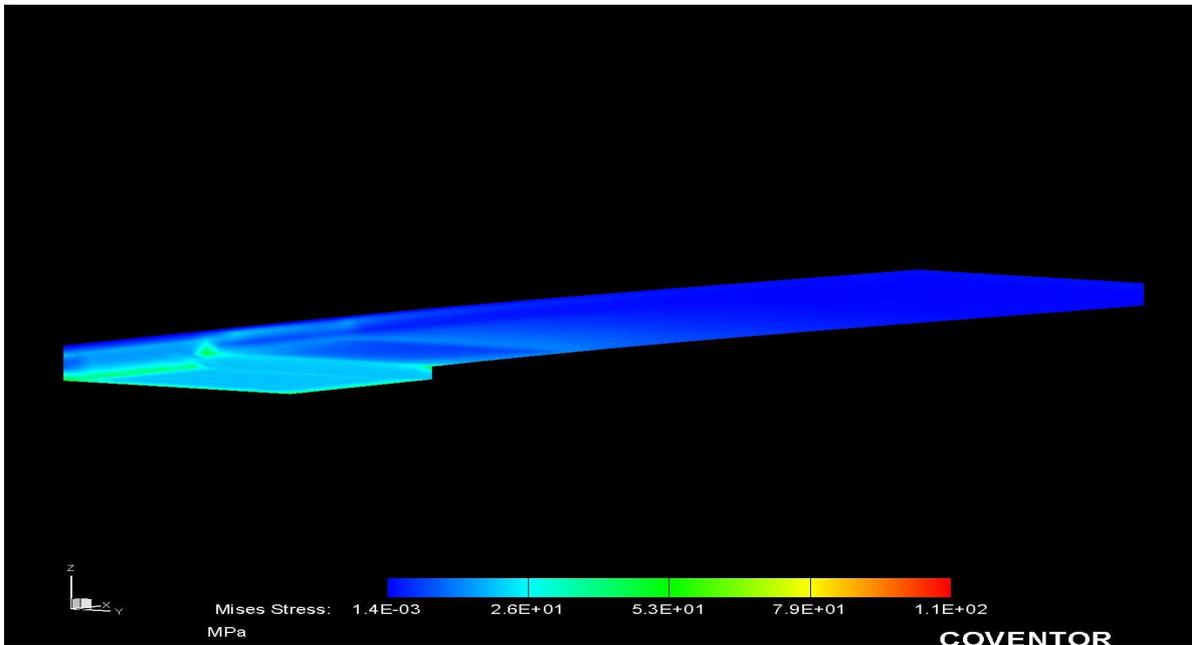


Ilustración 6-8 Distribución de esfuerzos para una carga de 0.050 MPa

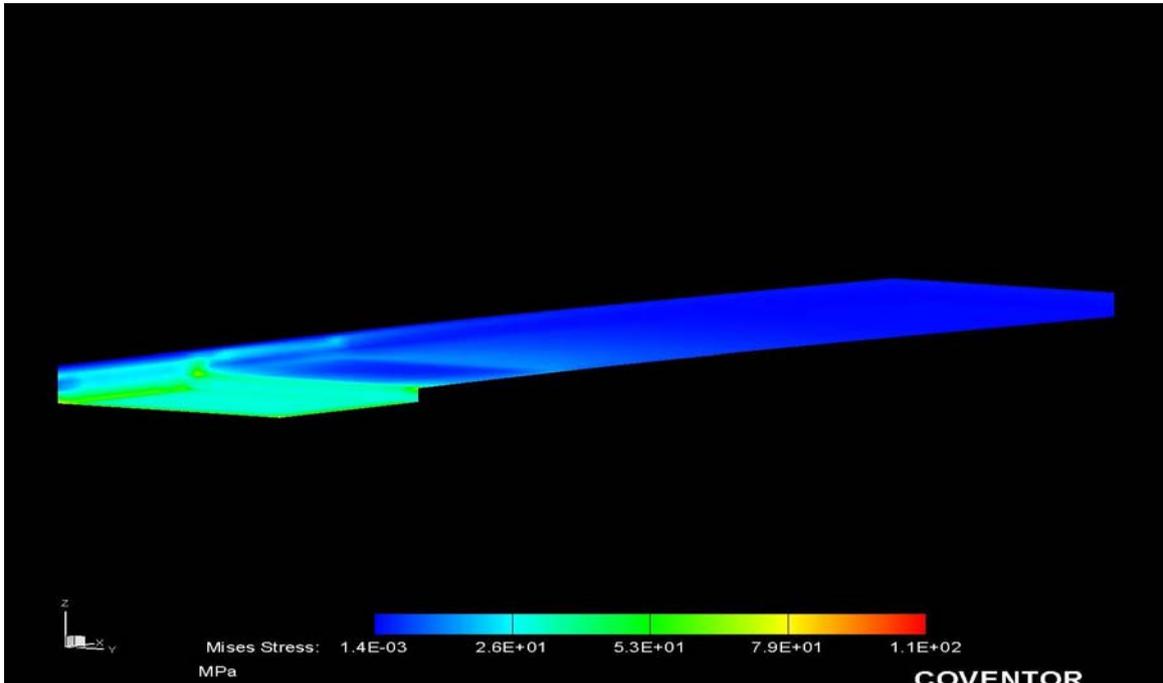


Ilustración 6-9 Distribución de esfuerzos para una carga de 0.75 MPa

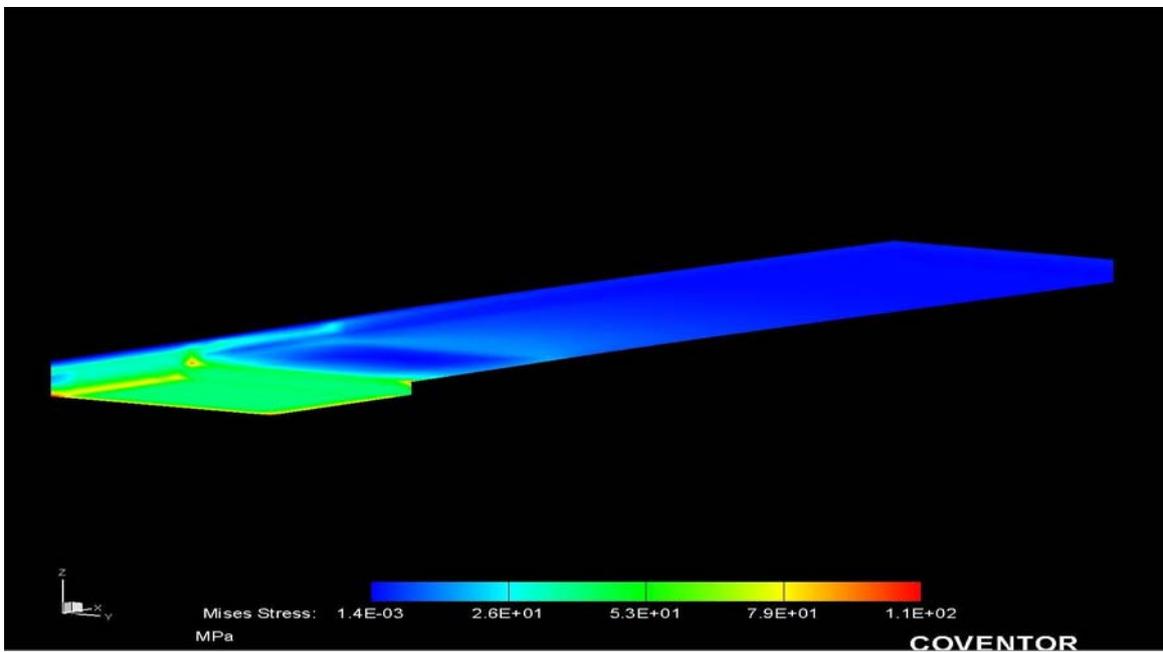


Ilustración 6-10 Distribución de esfuerzos para una carga de 0.1 MPa

7 Conclusiones

Analizando las gráficas resultantes del análisis de elemento finito se concluye que para absorciones de humedad equivalentes a esfuerzos con cargas de 0.05 MPa sobre la superficie del microcantilever, el comportamiento del microsensar no supera los esfuerzos máximos permitidos por el polisilicio que son de 930 MPa, lo que nos indica que el microcantilever no sufre falla. Para ese mismo esfuerzo se tiene un desplazamiento máximo de 0.7 μm que es el que nos indica el porcentaje de humedad relativa.

Bibliografía

1. Bao, Minhang. Analysis and design, Principles of MEMS devices. Elsevier. 2005.
2. Bashir R, Gupta A, Neudeck G W, McElfresh M y Gomez R. On the design of piezoresistivo silicon cantilevers with stress concentration regions for scanning probe microscopy applications. Reino Unido, 2000.
3. Chen Qi, Fang Ji, Hai-Feng Ji, Varahramyan Kody. Micromachined SiO₂ microcantilever for high sensitive moisture sensor. Springer-Verlag, 2007.
4. Chen Qi, Fang Ji, Hai-Feng Ji, Varahramyan Kody. Micromachined SiO₂ microcantilever for high sensitive moisture sensor. Ed. Springer – Verlag. 2007.
5. Coventor Ware. MEMS Design and Analysis Tutorials, Vol. 1, Physical and System-Level Design. 2007.
6. Coventor Ware. MEMS Design and Analysis Tutorials, Vol. 2, Physical and System-Level Design. 2007.
7. Dokmeci Mehmet, Najafi Khalil. A high-sensitivity polyimide capacitive relative humidity sensor for monitoring anodically bonded hermetic micropackages. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 10, No. 2, Junio 2001.
8. Gad-el-Hak, Mohamed. The MEMS Handbook. Introduction and Fundamentals. Segunda Edición. Boca Raton, Florida. 2006.
9. Govardhan K., Alex Z. C. MEMS Based Humidity Sensor. International Conference on smart materials structures and systems. Bangalore, India. 2005.
10. <http://es.wikipedia.org>
11. http://www.eco-sitio.com.ar/ea_09_mejorar_humedad_suelo.htm
12. <http://www.epson.com.mx/pais/GL/paginas/tecnologia/pruebasPermanencia.asp#4>

13. <http://www.fao.org/Wairdocs/X5403S/x5403s09.htm>
14. http://www.jshumidificadores.es/applications/SEURLF/ASP/SFS/APP_ID.77/SFE/details.htm
15. <http://www.memsnet.org/material/>
16. <http://www.mitecnologico.com/Main/HigrometrosYTermometros>
17. Johari, Hourii. Development of MEMS sensors for measurements of pressure, relative humidity and temperature. Tesis de Maestría. Worcester Polytechnic Institute. 2003.
18. Villarroya Gaudó, María. Diseño y fabricación de sistemas micro/nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores biológicos con palancas como elementos transductores. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España. 2005
19. Yuan Ma, Robinson A, Lawson Ron, Shen Bing, Strembicke Dereck, Allegretto Walter. Measuring the deflection of a micromachined cantilever-in-cantilever device using a piezoresistive sensor. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 1999.
20. Zhang Yin, Ren Quan, Zhao Ya-pu. Modelling analysis of surface stress on a rectangular cantilever beam. Journal of Physics. 2004