



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN MICROSENSOR PARA DETECCIÓN
EN EL ESPECTRO INFRARROJO

T É S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ELÉCTRICA ELECTRÓNICA

P R E S E N T A :

EDUARDO E RAMÍREZ SÁNCHEZ

TUTOR:

DR. VOLODYMYR SVYRYD

2006



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oleksandr Martynyuk
Secretario: Dr. Pablo Roberto Pérez Alcázar
Vocal: Dr. Volodymyr Svyryd
1er. Suplente: Dra. Margarita Navarrete Montesinos
2do. Suplente M.I Arturo Haro Ruiz

FACULTAD DE INGENIERIA

TUTOR DE TESIS:

DR. VOLODYMYR SVYRYD

Diseño de un microsensor para detección en el espectro infrarrojo

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería

Presenta:

Eduardo E Ramírez Sánchez

Febrero 2005

Reconocimientos

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Volodymyr Svyryd su ayuda y consejos durante este trabajo. También agradezco la ayuda proporcionada por el Dr. Eduardo Arriola Valdés por concederme el tiempo para realizar éste trabajo e igualmente agradezco a los revisores de la tesis para poder llevarla a buen término.

A mi familia
Mi esposa Mari Carmen
Mis hijos Vanesa y Eduardo
y a mis padres

Contenido

Reconocimientos	iv
Resumen	vi
Capitulo 1. Introducción	1
1.1 El microsensor	1
1.2 El microcantilever	1
1.3 Funcionalidad intrínseca multifacética	3
1.4 Modo dinámico	4
1.5 Modo estático	5
Capitulo 2. Fundamentos y tipos de sensores infrarrojos	11
2.1 La radiación infrarroja	11
2.2 Detectores infrarrojos	16
2.3 Tipos de detectores infrarrojos	16
2.3.1 Detectores de fotones	16
2.3.2 Detectores de energía térmica	18
2.4 Detectores infrarrojos, formatos y arquitecturas	20
2.5 Detección de brazas	23
Capitulo 3. Dispositivo y modelado	29
3.1 El microsensor infrarrojo	29
3.2 Materiales	30
3.3 Método analítico ecuación de Eulerr-Bernulli	35
3.4 Comportamiento termomecánico	48
3.5 Esfuerzo inducido térmicamente	53
3.6 Sensibilidad	56
3.7 Sensibilidad del microcantilever	56
Capitulo 4. Lector de salida	59
4.1 Lector piezorresistivo	59
4.2 Piezorresistividad	61
4.3 Geometría del piezorresistor	61

4.4	Esfuerzo en el plano de un microcantilever	63
4.5	Polisilicio	64
4.6	Señal mínima detectable	64
4.7	El lector de salida	65
4.8	Resolución	66
4.9	Fuentes de ruido	66
4.9.1	Ruido de Jonson	67
4.9.2	Ruido $\frac{1}{f}$	67
4.9.3	Ruido termomecánico	68
4.9.4	Ruido total	69
4.10	Esfuerzo en el plano	69
4.11	Esfuerzo de superficie	71
4.12	Esfuerzo de superficie en un cantilever de una capa	72
Capítulo 5. Geometría, trazado y mascarar		78
5.1	Flujo del proceso	78
Capítulo 6. Diseño y simulación		93
6.1	Dimensiones y desempeño esperado	93
6.2	Dimensiones	94
6.3	Modelo de elemento finito	98
6.3.1	Simulación utilizando el método de elemento finito	98
6.3.2	Implementación del modelo de elemento finito del microcantilever	99
6.3.3	Simulación	101
6.4	Propuesta para una mejor sensibilidad	109
6.4.1	Películas metálicas delgadas	110
6.4.2	Metales negros porosos	110
6.4.3	Metales porosos depositados por evaporación	114
Capítulo 7. El sensor de brazos		117
7.1	El microcantilever como sensor de brazos	117
7.2	Resumen de las características del sensor	123

Capitulo 8	Conclusiones	128
Bibliografía		130

Lista de Figuras

1.1	Microcantilever	2
1.2	Microcantilever usado como sensor en un microscopio	2
1.3	Diagrama de flujo de los principios de transducción	3
1.4	Cantilever operando en modo dinámico	4
1.5	Deflexión debida a esfuerzos internos	6
1.6	Deflexión debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica	7
1.7	Mecanismo de esfuerzo inducido por un analito	9
1.8	Mecanismo de esfuerzo inducido por un analito	10
1.9	Mecanismo de esfuerzo inducido por un analito	10
2.1	Radiación de diferentes objetos y condiciones	12
2.2	Bandas para la detección infrarroja	13
2.3	Aplicaciones de la detección del espectro infrarrojo	15
2.4	Conexión directa	21
2.5	Hibrido indirecto	21
2.6	Detector monolítico	22
2.7	Tecnología Z	22
2.8	Lazocavidad	22
2.9	Emisión espectral de combustible	24
2.10	Respuesta espectral de un detector de flama ultravioleta	25
2.11	Respuesta espectral de un detector de flama ultravioleta/ infrarrojo	26
2.12	Aplicaciones de los sensores de braza/chispa	28
3.1	Comparación entre el flujo de proceso de C. I y de los MEMS	29
3.2	Construcción de un par diferencial a base de microcantilevers	30
3.3	Transducción termo-mecánica	32
3.4	Desplazamiento fuera del plano del eje neutro	35
3.5	Esfuerzo directo	37
3.6	Fuerzas resultantes	37
3.7	Fuerzas y momentos de equilibrio	39
3.8	Modelo del momento flexionante	44

3.9	Fuerzas cortantes, momentos, pendientes y deflexión	45
3.10	Momento intermedio concentrado	46
3.11	Desplazamiento, pendiente	47
3.12	Fuerzas cortantes, momentos y deflexión	48
3.13	Deflexión debido a la diferencia de temperatura	49
3.14	El calores absorbido uniformemente	52
3.15	Radio de curvatura	54
4.1	Esfuerzo σ sobre la capa delgada t_1 en la superficie del cantilever	60
4.2	La dirección longitudinal es a lo largo de las líneas de corriente	61
4.3	Geometría del piezorresistor	62
4.4	Cantilevers en configuración de puente de Wheastone	65
4.5	Distribución de la deformación a través del cantilever	70
4.6	Deformación como función de la posición dentro de un cantilever	73
4.7	Factor de galga longitudinal y transversal para polisilicio	75
4.8	Geometría del piezorresistor del microcantilever	76
5.1	Vista de una oblea de silicio	78
5.2	Orientaciones cristalográficas usadas en MEMS	79
5.3	Numero de deposiciones (8) y numero de mascarar (7)	79
5.4	Mascara m0 para definir la capa de sacrificio	80
5.5	Trazado de la capa de sacrificio	81
5.6	Cámara de deposición CVD	82
5.7	Mascara m1 para definir el anclaje de los microcantilevers	82
5.8	Anclaje de nitruro de silicio para los microcantilevers	83
5.9	Mascara m2 para trazar los microcantilevers	84
5.10	Trazado de los microcantilevers en el nitruro de silicio	84
5.11	Horno de difusión de boro	85
5.12	Mascara m3 usada para definir los piezorresistores	85
5.13	Vista del trazado de los sensores piezorresistivos	86
5.14	Mascara m4 usada para definir los microcantilevers completos	87
5.15	Vista del trazado de los microcantilevers	87
5.16	Mascara m5 para definir las áreas de contacto	88
5.17	Área de contacto de los piezorresistores para su conexión	88
5.18	Deposición del aluminio en un evaporador térmico	89
5.19	Mascara m6 para definir el alambrado metálico	90

5.20	Vista del trazado del alambrado metálico	90
5.21	Mascara m7 para definir el microcantilever bimorfo	91
5.22	Microcantilevers con la segunda capa de metal	91
5.23	Sensor infrarrojo después del fin del proceso	92
5.24	Vista de la oblea incluyendo todos los dados	92
6.1	Instalaciones del INAOE	93
6.2	Dimensiones del microcantilever	94
6.3	$\sigma_{s \text{ min}}$ como una función del espesor del piezorresistor	96
6.4	Modelado con elemento finito del sistema	99
6.5	Simulación del desplazamiento del microcantilever	100
6.6	Modelo de elemento finito del microcantilever a analizar	100
6.7	Modelo de elemento finito usado en la simulación	102
6.8	Incremento de temperatura en la superficie del microcantilever	103
6.9	En a), b) anclaje, m113, m214 condiciones frontera	104
6.10	Deflexión del microcantilever (μm)	105
6.11	Deflexión del microcantilever con la variación de temperatura	106
6.12	Resultados empleando el modelo analítico	107
6.13	Esfuerzos de Von Mises sobre le microcantilever	108
6.14	Deberá construirse el sensor para validar los modelos	109
6.15	Fotografía del platino negro	111
6.16	Reflejancia al infrarrojo del platino negro	111
6.17	Absorción del platino negro contra masa por área	112
6.18	Esquema de la ubicación del pigmento en los poros	113
6.19	Comportamiento espectral comparativo de anodinados	113
6.20	Fotografía de oro negro	114
6.21	Reflejancia infrarroja del oro negro, espesor $250 \mu g / cm^3$	115
6.22	Absorbancia del oro negro contra masa por área	115
7.1	Sensores de braza	118
7.2	Parte real (n) e imaginaria (k) del índice de refracción	119
7.3	Atenuación de la luz dentro de un sólido	120
7.4	Variación de la absorbancia dependiente de la temperatura	120
7.5	Cambio de resistencia en función de la deflexión	121
7.6	Voltaje de salida en función del cambio de resistencia	122
7.7	Instrumentación del microcantilever	124
7.8	Ancho de banda de la ventana de sílice	126

7.9 Frecuencia de corte del filtro	127
7.10 Materiales propuestos para el empaquetado del microcantilever	127

Lista de Tablas

3.1	Propiedades de los materiales para el microcantilever	31
4.1	Esfuerzo en el plano de un cantilever	64
6.1	Espesor del cantilever y del piezorresistor	96
6.2	Parámetros usados para la optimización	96
6.3	Características calculadas del sensor de esfuerzos del cantilever	97
7.1	Características del microsensor	124

Resumen.

En esta tesis se hizo el diseño y simulación de un microsensors el cual detecta una pequeña banda del espectro infrarrojo para poder ser utilizada en la detección de brasas en sistemas de seguridad de incendios.

El diseño incluye un microcantilever bicapa que se deflexiona debido a esfuerzos que son inducidos térmicamente. El trabajo de diseño incluyó encontrar los valores teóricos de la constante de resorte, frecuencia de resonancia, la sensibilidad, ruido y las ecuaciones de diseño para esfuerzos inducidos térmicamente.

Para medir la deflexión del microcantilever, se integró a este un lector de salida del tipo piezorresistivo y se generaron las ecuaciones que gobiernan a este tipo de lector de salida.

Se hizo una simulación seleccionando el método de elemento finito para corroborar la validez del modelo analítico que predice la deflexión del microcantilever en función de la temperatura.

Basándose en el modelo analítico y en las características del lector de salida se diseñó el sensor de brasas.

Igualmente se propuso el proceso de construcción del microcantilever.

Capítulo 1. Introducción

1.1 El microsensor

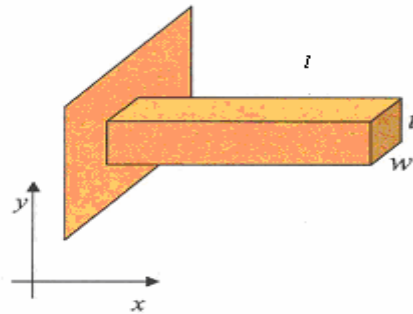
En este trabajo se desarrolla el diseño de un microsensor para que detecte una porción del espectro de radiación infrarroja y así aplicarlo en el sentido de brazas.

El objetivo principal es el diseño de un sensor **simple y de bajo costo** que tenga una aplicación práctica, en este caso es el de detectar una pequeña porción de la banda del espectro infrarrojo para aplicarlo en la detección de brazas con el objeto de prevenir incendios.

1.2 El microcantilever

El diseño del sensor propuesto en este trabajo se basa en un microcantilever por lo que en este capítulo se describen las bondades, funcionamiento y aplicaciones de esta micro-estructura mecánica. Esta micro-estructura [23] se empezó a utilizar como una sonda de fuerza en los microscopios de fuerza atómica (AFM), pero debido a la resolución de subnanómetros de este tipo de sonda construida de silicio y nitruro de silicio, se ha aplicado a la medición de una gran variedad de señales tales como, acústicas, ruido, temperatura, humedad y presión, esto ha dado origen a una nueva familia de sensores. Se encontró que los microcantilevers para un AFM funcionan como microcalorímetros, los cuales ofrecen una sensibilidad de femtojoules y una mejora substancial sobre la mayoría de las aproximaciones tradicionales. Midiendo el desplazamiento en la frecuencia de resonancia en un microcantilever se encontró que este es un dispositivo sensible a la masa el cual supera a los sensores gravimétricos piezoeléctricos. La sensibilidad del microcantilever a diminutas cantidades de absorbentes es superior a las tradicionales microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM) y a los transductores de ondas acústicas de superficie (SAW). Así, esto ha generado un gran interés en los microcantilevers como una nueva plataforma para una gran variedad de sensores físicos y químicos.

A diferencia de otro tipo de transductores para sentido químico, los microcantilevers son dispositivos mecánicos muy simples. Estos son pequeñas placas u hojas de muelles, típicamente de 0.2 a 1 μm de espesor (t), de 20 a 100 μm de ancho (w) y de 100 a 500 μm de largo (l), como se muestra en la figura 1.1.



Asuma que el eje x está en el centro de la viga

Figura 1.1 Microcantilever

Cuando en el microcantilever se tiene una punta afilada en la parte baja de este, se usa como una sonda para hacer un mapa de la topología de una superficie en AFM, muy parecido al estilete de los antiguos fonógrafos que actuaba sobre las cavidades de un disco, figura 1.2.

AFM Piezoresistivo

Tortenesse et al. 1991: primer AFM con sensor de fuerza piezoresistivo

- El generador de Scan mueve la muestra en dirección x y y
- Un controlador ajusta el eje z para mantener constantes las fuerzas atómicas

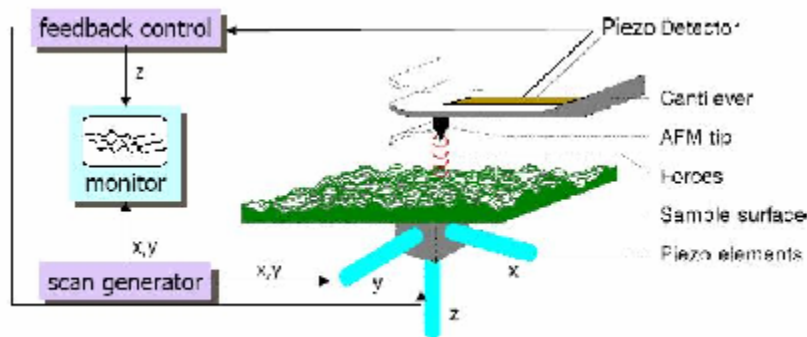


Figura 1.2 Microcantilever usado como sensor en un microscopio de fuerza atómica.

Los sensores basados en microcantilevers involucran la medición de la deflexión del microcantilever o el desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Sin embargo, los mecanismos que trasladan los diferentes componentes físicos, químicos o biológicos del ambiente dentro de estos parámetros son generalmente diferentes a con los que opera un microcantilever para un AFM.

1.3. Funcionalidad intrínseca multifacética

Una gran variedad de mecanismos de transducción están involucrados en el funcionamiento de los sensores basados en microcantilevers. Dependiendo del parámetro a medir (deflexión del cantilever o frecuencia de resonancia), el modo de operación del cantilever puede ser estático o dinámico. Cada uno de estos modos esta asociado con diferentes escenarios de transducción, ver la figura 1.3.

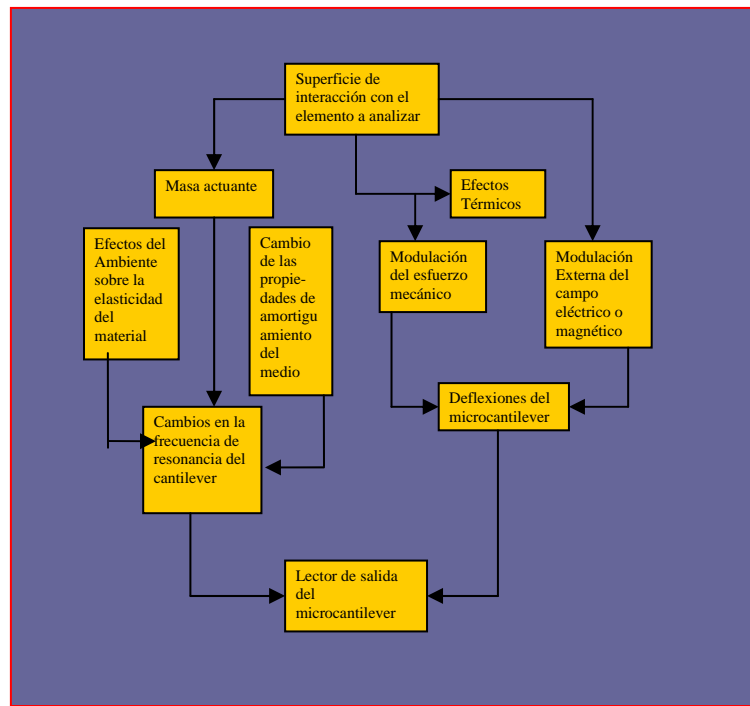


Figura 1.3 Diagrama de flujo de los principios de transducción que son operativos con los microcantilevers usados como sensores.

La deflexión estática de un microcantilever puede ser causada ya sea por fuerzas externas sobre el cantilever o por esfuerzos internos generados sobre o dentro del microcantilever.

Aunque la tecnología de fabricación de los microcantilevers es capaz de producir estructuras casi libres de esfuerzos internos, esfuerzos intrínsecos adicionales pueden ser subsecuentemente originados por expansión térmica y procesos interfaciales. Estos procesos interfaciales que originan la deflexión de los cantilevers son relevantes a algunos de los intrigantes resultados obtenidos usando sensores a base de microcantilevers. También es posible realizar sensores ambientales en el cual la deflexión es causada por campos eléctricos o magnéticos externos.

1.4 Modo dinámico.

Los microcantilevers operando en modo dinámico, figura 1.4 son esencialmente osciladores mecánicos que pueden ser evaluados totalmente usando modelos clásicos.

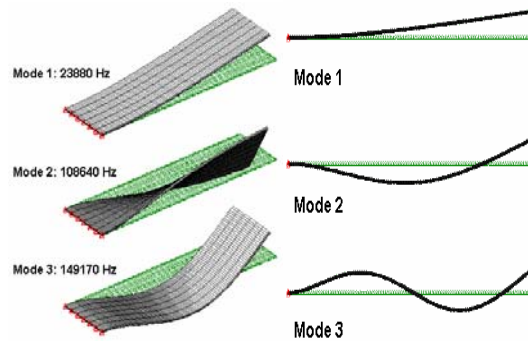


Figura 1.4. Cantilever operando en modo dinámico

En muchas aplicaciones de sensado, las oscilaciones de los cantilevers son insignificanamente amortiguadas por el medio en el cual reside el microcantilever o por las cubiertas sobre sus superficies. Bajo estas condiciones, una masa adicional suspendida Δm , la cual es debida al elemento a analizar (análito) unido al cantilever, puede ser directamente relacionada al desplazamiento en la frecuencia de resonancia del microcantilever, f , desde f_0 hasta f_1 por

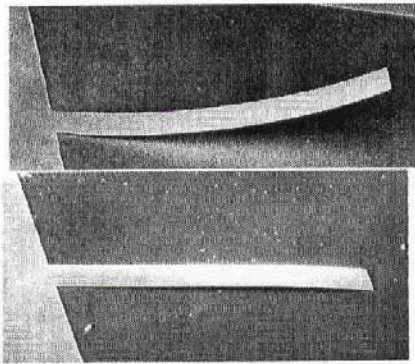
$$\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} = \frac{\Delta m}{4\pi^2 k}$$

en el cual k es la constante de elasticidad del microcantilever. Se puede concluir de la ecuación anterior que las frecuencias fundamentales altas son requeridas en los resonadores típicos para lograr una apreciable sensibilidad de masa. Sin embargo, los cantilevers que resuenan de 20 a 200 khz pueden tener una mayor sensibilidad a la masa cuando se compara con sensores del tipo QCM y SAW operando de 5 a 500 Mhz. Esta sensibilidad es a consecuencia de la relativa rigidez baja y pequeñez de la masa suspendida de la estructura de un microcantilever. Para cantilevers en la nanoescala con frecuencias fundamentales similares a los SAW (10^5 a 10^6 hz), los cálculos predicen sensibilidad de masa abajo del nivel de una sola molécula (10^{-21} g).

1.5 Modo estático

En la ausencia de fuerzas externas como la gravitacional, la magnética y la electrostática, la deflexión de un microcantilever esta claramente relacionada con la asimetría, del esfuerzo diferencial mecánico generado en el microcantilever. Esto se debe a que regiones localizadas sujetas a esfuerzos, tales como límites granulados, huecos e impurezas dentro de las películas, son responsables de generar esfuerzos intrínsecos en muestras desordenadas, amorfas y policristalinas, ver figura 1.5.

Gradiente de esfuerzos residuales

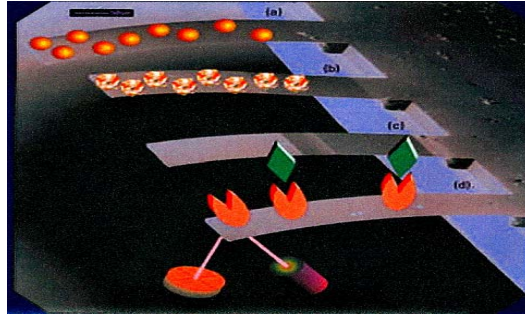


Mayor tensión en la parte superior

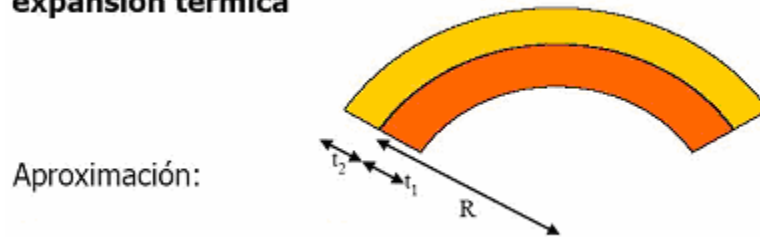
Más compresión sobre la parte superior

Figura 1.5 Deflexión debida a esfuerzos internos

Ahora la deflexión se puede dar por ejemplo debido a los esfuerzos inducidos térmicamente y esto es típico para los microcantilevers que están cubiertos de metal, por lo cual el material base y la cubierta de metal tienen diferentes coeficientes de expansión térmica. Entonces, un cambio en la temperatura produce expansiones desiguales de las capas en el cantilever bimaterial y por lo tanto una deflexión. Aunque este mecanismo es idéntico a la deflexión de una placa bimetálica convencional del mundo macroscópico (tales como las usadas en los termostatos) este traslada la sensibilidad a un nivel de femtojoules en el caso de diminutos microcantilevers. Como resultado, la presencia de especies analíticas pueden ser detectadas por el calor que producen por medio de su absorción sobre el microcantilever o en el curso de reacciones químicas subsecuentes asociadas con la absorbancia, ver la 1.6.



Dos capas de materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica



$$R = \frac{t_1 + t_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

$$t_i = \text{espesor_de_la_capa_i}$$

$$\varepsilon = \text{deformacion_termica_de_la_capa_i}$$

Figura 1.6 Deflexión debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica, debido a reacciones químicas o absorción de radiación

El proceso de absorción molecular, las reacciones químicas interfaciales y la interacción con fotones puede afectar también directamente los esfuerzos mecánicos en el microcantilever independientemente de los efectos térmicos.

Se conoce que la absorbancia molecular y atómica en las caras de un cristal tiende a inducir cambios significativos en el esfuerzo de las superficies donde ocurre esta absorbancia.

Los sistemas coloidales son otra clase de materiales en los cuales la absorbancia y el esfuerzo interfacial inducido químicamente han sido estudiados tradicionalmente. Por ejemplo, los cambios en el esfuerzo interfacial son asociados con la dilatación de hidrogeles cuando se hidratan o con la formación de monocapas superficiales para la interfase agua-aire.

A diferencia de sus predecesores macroscópicos, los microcantilevers aparecen como disponibles para hacer mediciones en tiempo real de los cambios en los esfuerzos superficiales en el rango bajo de miliNewtons/m y por lo tanto, capaces de convertir cambios en la energía libre de Gibbs causada por fusión de la interacción analito-sitio dentro una respuesta mecánica medible rápidamente. Un microcantilever para sensado químico es normalmente modificado para que uno de sus lados sea relativamente pasivo, mientras el otro exhiba alta afinidad al analito analizado. Consecuentemente, cambios en el esfuerzo diferencial de superficie pueden ser gobernados primeramente por cambios en la energía libre de Gibbs asociados con la absorción (interacción de superficie) o proceso de absorción (interacción de la fase volumétrica con las películas delgadas) sobre el lado activo. Funcionando de esta manera, los transductores microcantilever son compatibles con muchas fases sensibles y pueden funcionar en ambientes líquidos y gaseosos. Para entender como diferentes recubrimientos proveen respuestas químicas de los microcantilevers trabajando en un modo de deflexión estático, es usual considerar tres tipos distintos.

Primer tipo

El primer tipo es el más adecuado cuando la interacción entre el microcantilever y su medio ambiente están confinados a la superficie. Un ejemplo de esta situación se muestra en la figura 1.7, en esta se muestra la absorción química de una cadena abierta recta de moléculas de thiol sobre un cantilever cubierto con una película de oro. En otras palabras, las superficies usualmente tienden a expandirse como resultado del proceso de absorción. Este tipo de cambio de esfuerzo en la superficie esta definido como compresivo, refiriéndose a la posibilidad de que la superficie pueda retornar a su estado original de compresión.

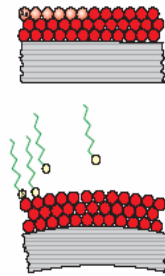


Figura 1.7 Mecanismos de esfuerzo inducidos por un analito.
Se muestra un esfuerzo compresivo (expansivo)
para una unión química de un compuesto de thiol a
una superficie cubierta de oro

Segundo tipo

El segundo tipo de analito-esfuerzo inducido es aplicable cuando un microcantilever es modificado con una cubierta permeable a un analito, que es mucho mas delgada que una *monocapa*. En este caso, la interacción de las moléculas del analito con el volumen de la fase responsiva son tomadas en cuenta y un mecanismo predominante de la deflexión del cantilever es descrito como un analito-inductor de protuberancias en la cubierta véase la figura 1.8. Tal proceso de protuberancia puede ser cuantificado usando aproximaciones desarrolladas en ciencias coloidales y de polímeros (es decir evaluando fuerzas moleculares actuando sobre la cubierta y entre la cubierta y las especies analitas). En general las fuerzas de dispersión, electrostática, dispersión de los átomos, osmótica y de solvatación actuando dentro de la cubierta pueden ser alteradas por los analitos absorbidos.

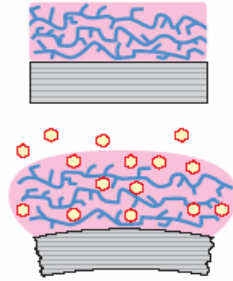


Figura 1.8 Mecanismo de esfuerzo inducido por un analito.
 Protuberancia de una película delgada sobre una superficie
 debido a la absorción de un analito.

Tercer tipo

El tercer tipo es relevante para interfaces estructuradas y a cubiertas que han sido reconocidas recientemente como una clase muy prominente de fases responsivas para sensores con cantilevers. Muchas de estas fases estructuradas son conocidas por su comportamiento como “esponjas” moleculares. El analito inductor de deflexión de cantilevers con esas fases, combina mecanismos de volumen, superficie e interacción ínter superficies véase la figura 1.9. Una combinación de estos mecanismos facilita la conversión eficiente de energía de la interacción del analito con el receptor en energía mecánica la cual da la deflexión del cantilever.

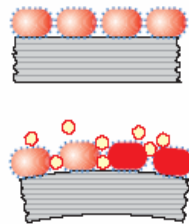


Figura 1.9. Mecanismos de esfuerzos inducidos por un analito.
 Fuerzas intersticiales cuando un analito se une a una
 superficie nanoestructurada.

Capítulo 2. Fundamentos y tipos de sensores infrarrojos

2.1- La Radiación Infrarroja

Inicialmente se da un bosquejo generalizado de la aplicación de los sensores infrarrojos así como los diferentes tipos que existen de, sus formatos y arquitecturas [24].

En 1800, Sir William Herschel, llevó a cabo un experimento para estudiar los efectos caloríficos de la luz solar. Él usó un prisma para separar la luz generando así un arco iris, que es lo que ocurre cuando la luz es dividida en sus colores; al mismo tiempo, usó un termómetro para medir la temperatura de cada color. Según se fue moviendo de la región violeta a la roja, la temperatura aumentó; sin embargo, cuando puso el termómetro en la región más allá del color rojo, la temperatura continuó aumentando, aun cuando no había luz visible para el ojo humano. William Herschel había descubierto la porción del espectro electromagnético conocido como infrarrojo.

La temperatura de un objeto determina que tanta radiación es emitida y para que longitud de onda en particular, la figura 2.1 muestra los perfiles de radiación de diferentes objetos y condiciones. A mayor temperatura de un objeto, mayor será el espectro de energía radiada (o emitancia) para todas las longitudes de onda y con una amplitud de onda pico dominante. Por ejemplo, el sol tiene una temperatura equivalente de 5900 K y una longitud de onda pico de $0.53 \mu\text{m}$ (luz verde) y además emite una copiosa cantidad de energía desde el ultravioleta y más allá de la región infrarroja. Un avión de combate trabajando se aproxima a los 800 K, por lo que no existe el suficiente calor para emitir radiación en la región visible del espectro, presentándose el pico de emisión, a grosso modo en los tres micrómetros; es decir, se localiza en la región infrarroja.

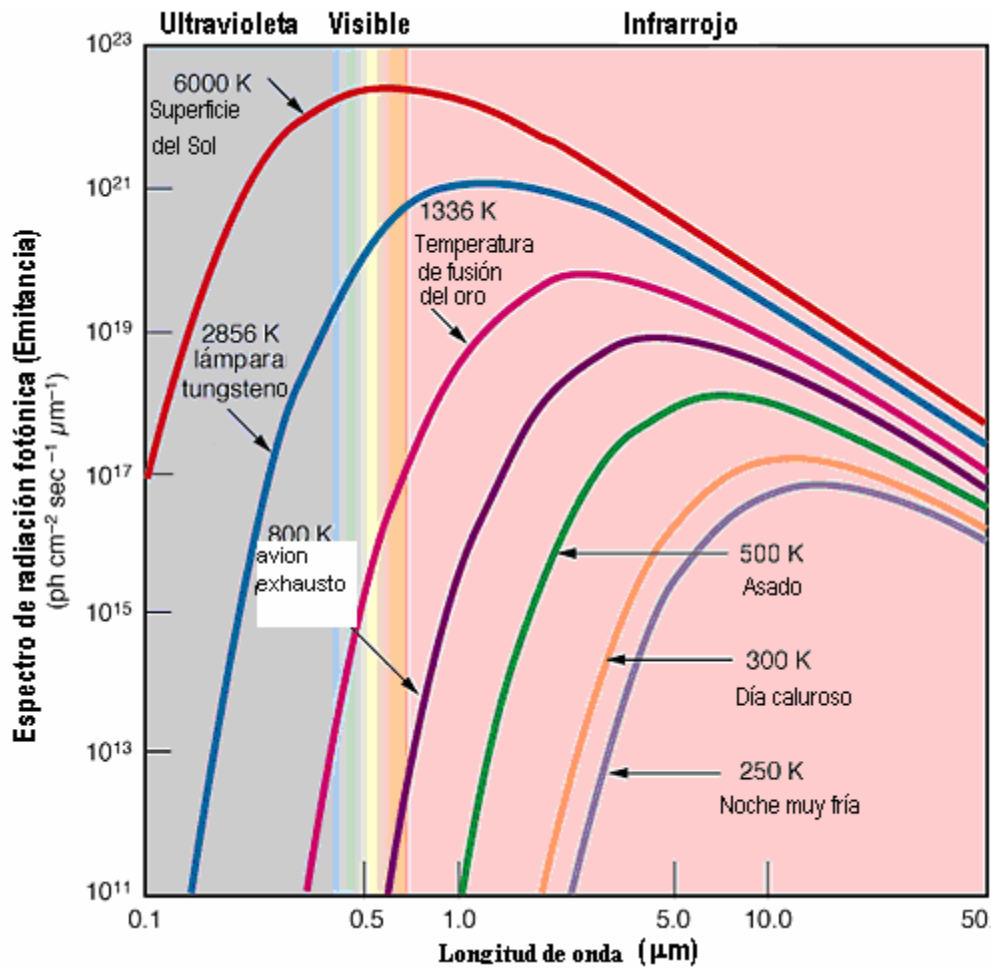


Figura 2.1 Radiación de diferentes objetos y condiciones.

Muchas de las emisiones del espectro IR (infrarrojo) no pueden ser usadas por los sistemas de detección porque la radiación es absorbida por el agua o el dióxido de carbono que existe en la atmósfera. Sin embargo, existen varias bandas de longitudes de onda con buena transmisión tal como se observa en la figura 2.2. Las fronteras de estas bandas no son absolutas, pero la convención normal divide el espectro infrarrojo en cuatro bandas básicas.

La región de longitudes de onda IR muy larga (VLWIR) es una banda que está localizada en el rango de $14\mu\text{m} < \text{VLWIR} < 30\mu\text{m}$. Esta banda es usada para localizar objetos extremadamente fríos comparados con el fondo del medio ambiente.

La región de longitudes de onda IR larga (LWIR) es una banda que se extiende en el rango de $8\mu\text{m} < \text{LWIR} < 14\mu\text{m}$ con una transmisión atmosférica de casi el 100 % en el rango de $9\mu\text{m}$ a $12\mu\text{m}$. La banda LWIR ofrece excelente visibilidad en la mayoría de los objetos terrestres viéndose desde el espacio.

La región de longitudes de onda IR media (MWIR o MIR) es una banda que se extiende en el rango de $3.3\mu\text{m} < \text{MIR} < 5\mu\text{m}$ ofreciendo también una transmisión atmosférica cerca del 100 %, con el beneficio aunado de bajo ruido de fondo del medio ambiente.

Las región de longitudes de onda visible e IR corta (SWIR o IR cercana (NIR)) son una banda que se extiende en el rango de $1.5\mu\text{m} < \text{SWIR} < 2.5\mu\text{m}$, la cual corresponde a una banda de alta transmisión atmosférica, conteniendo la longitud de onda a la que se presenta la máxima iluminación solar lo cual hace que se puedan diseñar detectores con la mayor resolución dentro de las tres bandas. Sin embargo, sin luz de luna o luz artificial, los sensores de SWIR no proveen una ninguna imagen de objetos con temperatura de 300 K.

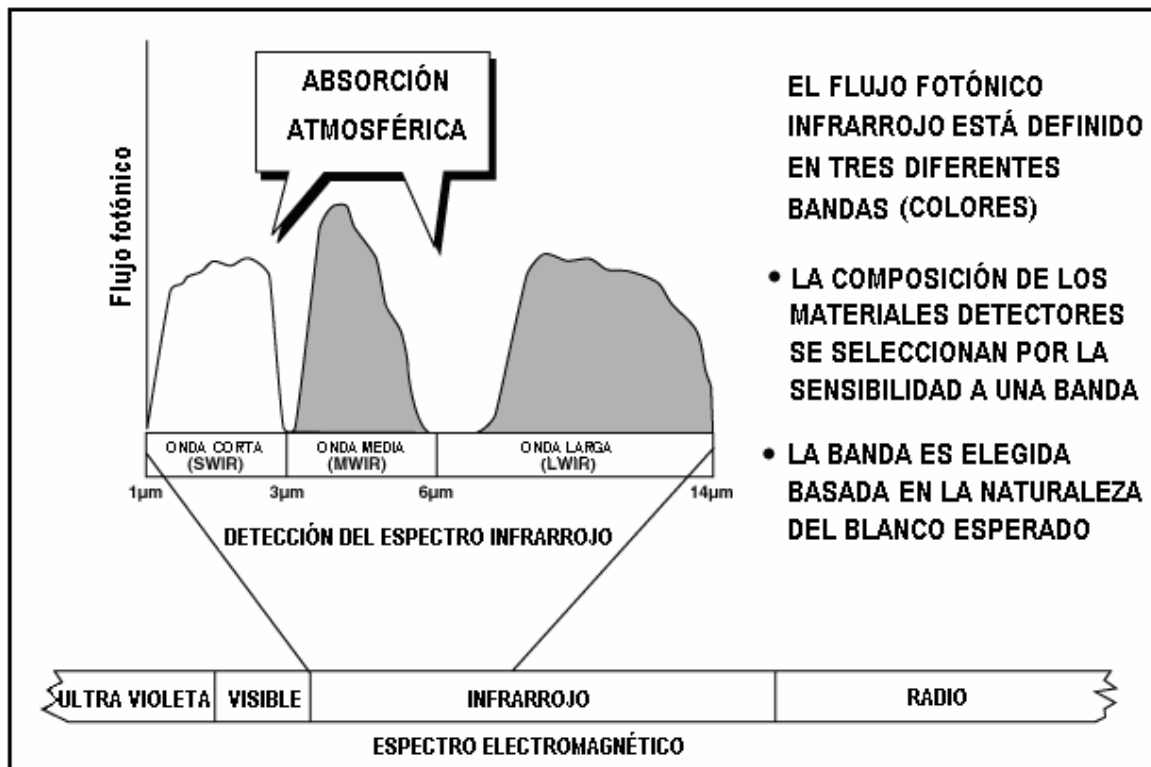


Figura 2.2 Bandas para la detección infrarroja.

Debido a que todos los objetos calientes emiten radiación infrarroja, el infrarrojo es una región espectral excelente para ser usada en la detección y seguimiento de objetos. Un objeto que emite radiación infrarroja puede ser detectado, medido y graficado usando un detector de radiación infrarrojo. Puesto que cada objeto tiene una única firma infrarroja, una identificación positiva se logra basándose en la energía recibida.

La detección a radiación infrarroja tiene aplicaciones extensas en los campos industrial, comercial, medico, militar etc., como:

- **Predicción y prevención.**

- Eléctrico: Producción, distribución, transporte.
- Mecánico: Motores, tuberías etc.
- Edificios y estructuras: Aislamientos, Filtraciones

- **Control y procesos.**

- Industria del automóvil
- Metalurgia
- Industrias de plásticos
- Petroquímicas.

- **Control de calidad**

- Electrónica: Diseño, verificación, diagnostico, etc.
- Montajes mecánicos: mal funcionamiento, fallos, análisis.

- **Ensayos no destructivos.**

- Cavidades e inclusiones en sólidos
- De laminación
- Detección de corrosión.
- Mezclas y aleaciones

- **Visión nocturna.**

- Seguridad
- Búsqueda y rescate

- **Investigación y desarrollo**

- Estudio de flujos de calor
- Estudios biológicos
- Evaluación de nuevos productos

- **Eléctricas**

- Malas conexiones
- Perdidas de aislamiento
- Sobrecargas
- Inducciones magnéticas

- **Astronomía infrarroja.**

- **Espectroscopia infrarroja**

y otras más, la figura 2.3 muestra algunas imágenes de las aplicaciones.



Figura 2.3 Aplicaciones de la detección del espectro infrarrojo.

2.2. Detectores infrarrojos

Para detectar la radiación infrarroja emitida por el calor de los objetos se requiere de un material sensitivo a esta radiación. Un detector infrarrojo es simplemente un transductor de energía radiante, convirtiéndola a una forma medible [8]. La radiación emitida por los objetos ofrece la posibilidad de poder ver en la oscuridad. La energía detectada es trasladada a imágenes, las cuales muestran las diferencias de emisión energía entre los objetos, permitiendo así que se puedan ver escenas oscuras figura 2.3.

2.3 Tipos de detectores infrarrojos

Existen dos métodos fundamentales para la detección IR, **detección de energía térmica y detección de fotones.**

Los detectores de energía térmica responden a cambios de temperatura generados por la radiación infrarroja incidente a través de cambios en las propiedades del material.

Los detectores de fotones generan portadores libres con carga eléctrica a través de la interacción de fotones y los electrones de la capa externa.

.

2.3.1 Detectores de fotones

En los fotodetectores la luz interactúa directamente con un semiconductor generando portadores eléctricos. Debido a que estos detectores no funcionan por cambio de temperatura, estos responden más rápidamente que los detectores de energía. Sin embargo, estos detectores son similares a la radiación IR generada por sus propios montajes y óptica y por lo tanto se enfrían a temperaturas criogénicas para minimizar el ruido de fondo. Los siguientes son ejemplos de foto detectores.

Clasificación de los fotodetectores

A. Detectores Intrínsecos

Detectores intrínsecos fotovoltaicos

Los detectores fotovoltaicos (PV) generan fotocorriente la cual puede ser monitoreada con un amplificador de transimpedancia. Estas fotocorrientes son creadas cuando incide la luz con una energía más grande o igual a la banda de energía o la juntura del diodo del semiconductor.

Los dispositivos PV operan con polarización inversa en el diodo; esto minimiza el flujo de corriente a través del dispositivo y minimiza la disipación de energía. En suma, los detectores PV son de bajo ruido, porque la juntura polarizada en inversa del diodo esta vacía de portadores minoritarios. Los detectores PV de mayor desempeño son fabricados con base en los siguientes materiales Si, Ge, GaAs, InSb y HgCdTe (MCT).

Detectores intrínsecos fotoconductivos

Los detectores fotoconductivos (PC) funcionan de una forma similar a la de los detectores PV. Luz incidente con energía mayor o igual a la energía de la banda del semiconductor genera portadores mayoritarios. Esto resulta en un cambio en la resistencia y por lo tanto en la conductividad del detector. Ejemplo de materiales para detectores PC son sulfuro de plomo (PbSe), selenio de plomo (PbS) y MCT.

B. Detectores extrínsecos

Los detectores extrínsecos están basados en Si (SiX) o Ge (GeX) dopado con impurezas tales como Boro, Arsénico y Galio. Estos son similares a los detectores intrínsecos; sin embargo, en los detectores extrínsecos los portadores son excitados desde el nivel de impurezas y no sobre la banda del material básico.

Detectores fotoemisivos

Los detectores fotoemisivos están basados en la emisión de portadores desde un metal dentro del material semiconductor a través de la absorción de luz. Un ejemplo típico es la Silicio de Platino (PtSi) sobre Si.

Fotodetectores infrarrojos cuánticos

El fotodetector infrarrojo cuántico (QWIP) es un detector que consiste de múltiples capas alternadas de arseniuro de galio (GaAs) y arseniuro de galio aluminio (AlGaAs).

2.3.2 Detectores de energía térmica

En los detectores de energía térmica, la absorción de energía IR calienta al elemento de detección, llevando esto a cambios en las propiedades físicas, las cuales pueden ser detectadas por instrumentos externos y ser correlacionadas con la escena bajo observación. Los detectores de energía contienen dos elementos, un absorbente y un transductor térmico. Los siguientes son ejemplos de detectores de energía.

Detectores piroeléctricos

Los detectores piroeléctricos consisten de un material polarizado el cual, cuando es sujeto a un cambio de temperatura, cambia en polarización. Estos detectores operan en sistemas que tienen un esquema de segmentación; la exposición a la escena genera una fluctuación en la polarización que produce una corriente alterna, la cual puede ser monitoreada con un amplificador externo.

Termopares/Termopilas

Los termopares están formados primariamente por la unión de dos metales disimilares los cuales crean un voltaje en su unión. Este voltaje es proporcional a la temperatura de la unión. Cuando una escena es ópticamente enfocada sobre un termopar, su temperatura aumenta o decrece según el flujo IR aumenta o disminuye. El cambio en el flujo IR emitido por la escena puede ser detectado monitoreando el voltaje generado por el termopar. Para una buena sensibilidad de detección, el termopar debe ser térmicamente aislado del medio que lo rodea. Para una respuesta rápida, el termopar debe de poderse liberar rápidamente el calor. Este trueque entre sensibilidad de detección y la habilidad de responder rápidamente a un cambio de escena, es inherente a todos los detectores de energía.

Una termopila es una serie de termopares conectados juntos para proveer un aumento en la responsividad.

Detectores ferroeléctricos.

Similar a los detectores piroeléctricos, los detectores ferroeléctricos están basados en un material polarizado, el cual, cuando esta sujeto a cambios en temperatura, cambia la polarización.

Termistor/Bolómetros/Microbolómetros.

En termistores, la resistencia de los elementos varía con la temperatura. Un ejemplo de un termistor es un bolómetro. Los bolómetros funcionan en una de dos maneras; monitoreo de voltaje con corriente constante o monitoreo de corriente con voltaje constante.

Los avances en el micromaquinado del silicio han conducido al campo de los microbolómetros. Un microbolómetro consiste de un arreglo de bolómetros fabricados directamente sobre un circuito lector de silicio. Esta tecnología ha demostrado excelentes imágenes del IR. Aunque el desempeño de los microbolómetros es menor al de los fotodetectores, se hacen actualmente desarrollos de investigación para lograr resultados parecidos. Los microbolómetros pueden operar a temperaturas cercanas al ambiente y por lo tanto no necesitan ser criogenicamente enfriados. Esta gran ventaja trae la posibilidad de producir sistemas de visión nocturna de bajo costo.

Microcantilevers.

Los microcantilevers están basados en la medición del efecto bimetalico para la medición de la radiación IR. Este efecto utiliza la diferencia en el coeficiente de expansión térmica de dos diferente bimetales para causar una deflexión de un microcantilever. Este desplazamiento del microcantilever se puede medir de forma capacitiva, óptica, piezorresistiva o por tunelaje.

2.4 Detectores infrarrojos, formatos y arquitecturas.

Los detectores infrarrojos están disponibles como detectores de un solo elemento, con geometría circular, rectangular, cruciforme y otras para sistemas reticulares y como arreglos lineales o arreglos de plano focal en 2D.

Los detectores de un solo elemento son normalmente iluminados por el frente y alambrados con dispositivos que se fusionan al detector. Los arreglos lineales y de 2D pueden ser fabricados con una variedad de dispositivos y diferentes arquitecturas para la señal de salida.

La primera generación de arreglos lineales se ilumina usualmente por enfrente, con la señal de salida del detector conectada por un alambrado fusionado a cada elemento en el arreglo. La señal de cada elemento es entonces llevada fuera del empaquetado del sensor y conectada a un preamplificador previo a la interfaz con el sistema de despliegue de imagen. Para el ajuste de la ganancia se hace en el preamplificador. Esta aproximación limita la primera generación de arreglos lineales a menos de doscientos elementos.

La segunda generación de arreglos lineales y en 2D son frecuentemente iluminados por la parte posterior a través de un substrato transparente. Algunas alternativas a las arquitecturas de planos focales se describen a continuación

La figura 2.4 ilustra el arreglo de un detector el cual esta eléctricamente conectado directamente a un arreglo de preamplificadores y o conmutadores llamado el lector de salida. La conexión eléctrica esta hecha con protuberancias de indio las cuales proveen un metal suave de interconexión para cada píxel. Este arreglo, comúnmente referido como un “hibrido directo”, facilita la interconexión de un gran número de píxeles a preamplificadores individuales acoplados por selectores de línea de columna y de renglón.



Figura 2.4 Conexión directa

La configuración de híbrido indirecto puede ser usada con un gran arreglo lineal para interfacear al detector con un sustrato el cual tiene un coeficiente de expansión térmico similar. Estos híbridos también se pueden usar para una hibridización serial, permitiéndosele al detector poder ser probado antes de unirlo al lector de salida, y o acomodar celdas unitarias lectoras de salida teniendo dimensiones mayores que las celdas unitarias de detección, aumentando la capacidad de almacenamiento de carga y por lo tanto extendiendo el rango dinámico. Los lectores de salida y los detectores son eléctricamente interconectados por un bus metálico trazado sobre el sustrato que sirve como abanico de salida figura 2.5.



Figura 2.5 Híbrido indirecto

Los arreglos de detectores monolíticos tienen integrados el detector y las funciones de lector de salida. Generalmente, en estos arreglos, los comandos y control de la electrónica de procesamiento de la señal son adyacentes al arreglo detector, en lugar de la parte baja. En este caso, los circuitos de procesamiento de la señal pueden ser conectados al detector por medio de un alambrado. En la configuración monolítica no es necesario que los circuitos de procesamiento de la señal se encuentren en el mismo sustrato en el que se encuentran el detector y el lector de salida o a la misma temperatura que tiene el detector. Los arreglos de detectores PtSi pueden construirse con el circuito de procesamiento incorporado sobre la periferia del circuito detector/lector a través del uso la tecnología de silicio empleada tal como se muestra en la figura 2.6.

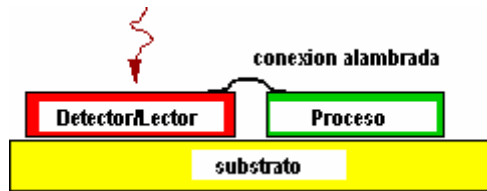


Figura 2.6 Detector monolítico

La tecnología Z, como se muestra en la figura 2.7 provee una área extensa al circuito de procesamiento por cada píxel en el circuito de lectura de salida, extendiendo la estructura en las direcciones ortogonales. En la aproximación ilustrada, circuitos de lectura de salida delgados son pegados juntos, o apilados y el arreglo detector esta conectado con indio sobre el borde de esta pila de circuitos de procesamiento de la señal.

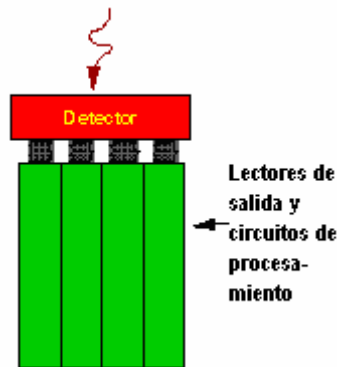


Figura 2.7 Tecnología Z

Finalmente, la aproximación “Lazocavidad”, como se ilustra en la figura 2.8 descansa sobre un delgado material detector después de fusionarlo adhesivamente al lector de salida de silicio. Los elementos del detector están conectados con vías debajo del lector de salida, las cuales son atacadas a través del material detector para hacer contacto con los cojinetes sobre el lector de salida y metalizarlos.

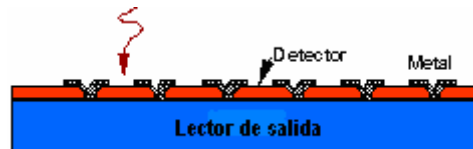


Figura 2.8 Lazocavidad

2.5. Detección de brazas.

Como se describió inicialmente, en este trabajo se desarrollara el diseño de un microsensor para la detección del espectro infrarrojo con aplicación a la detección de brazas [10] y su estructura se basa un microcantilever cuyo funcionamiento y aplicaciones se han descrito en este capítulo.

Este microsensor constara de dos microcantilevers que estarán cubiertos con una capa metálica en donde se absorberá la radiación infrarroja, la que a su vez producirá calor y provocara una deflexión en el microcantilever, proporcional a la cantidad de calor absorbido. Esta deflexión se medirá por medio de un lector piezorresistivo de salida y permitirá detectar la existencia de flama.

Esto nos lleva a definir que un detector de braza es un sensor de energía radiante emitida por una braza. Los detectores de braza se categorizan como de una sola longitud de onda infrarroja o múltiples longitudes de onda infrarroja.

El concepto de longitud de onda es extremadamente importante en la selección o diseño del detector para una aplicación en particular. Existe una interrelación precisa entre la longitud de onda de la luz que esta siendo emitida por la flama y la química de combustión producida por la flama. Eventos subatómicos y moleculares específicos producen energía radiante de una longitud de onda específica. Por ejemplo, fotones ultravioleta son emitidos como el resultado de la perdida completa de electrones o cambios muy grandes en los niveles de energía de los electrones. Durante la combustión las moléculas son violentamente apartadas por la reactividad química del oxígeno y los electrones son liberados en el proceso, recombinándose en niveles de energía drásticamente bajos, dando paso a la aparición de radiación ultravioleta. La radiación visible es generalmente el resultado de pequeños cambios en los niveles de energía de los electrones de las moléculas del combustible, intermediarios de flama y productos de la combustión. La radiación infrarroja viene de la vibración de las moléculas o parte de las moléculas cuando ellas están en un estado supercaliente asociado con la combustión.

Cada componente químico exhibe un grupo de longitudes de onda a las cuales resuena. Estas longitudes de onda constituyen el espectro químico infrarrojo, el cual es usualmente único para ese componente.

La interrelación entre la longitud de onda y la combustión química afecta el desempeño relativo de diferentes tipos de detectores con respecto de diferentes fuegos [10].

Este tipo de sensores pueden ser de detección de braza o detección de fuego. La física que gobierna ambos tipos de detectores básicamente es la misma pero las aplicaciones son diferentes. Únicamente una aproximación de diseño es reconocida para este tipo de detectores. Esta aproximación esta basada en su desempeño de detención, cada detector tiene atributos únicos de desempeño y el diseñador del sistema debe tomar en cuenta los atributos de diseño del sensor.

Para cada tipo de sensor de energía radiante, el fuego que va ha ser detectado debe ser cuantificado en términos de una tasa de liberación de energía (potencia).

La emisión radiante de las flamas y de las brazas son muy diferentes, como se observa en la figura 2.9. Además, detectores de flama y detectores de chispa/brazas son usados en diferentes contextos. Aunque estas comparten principios físicos similares.

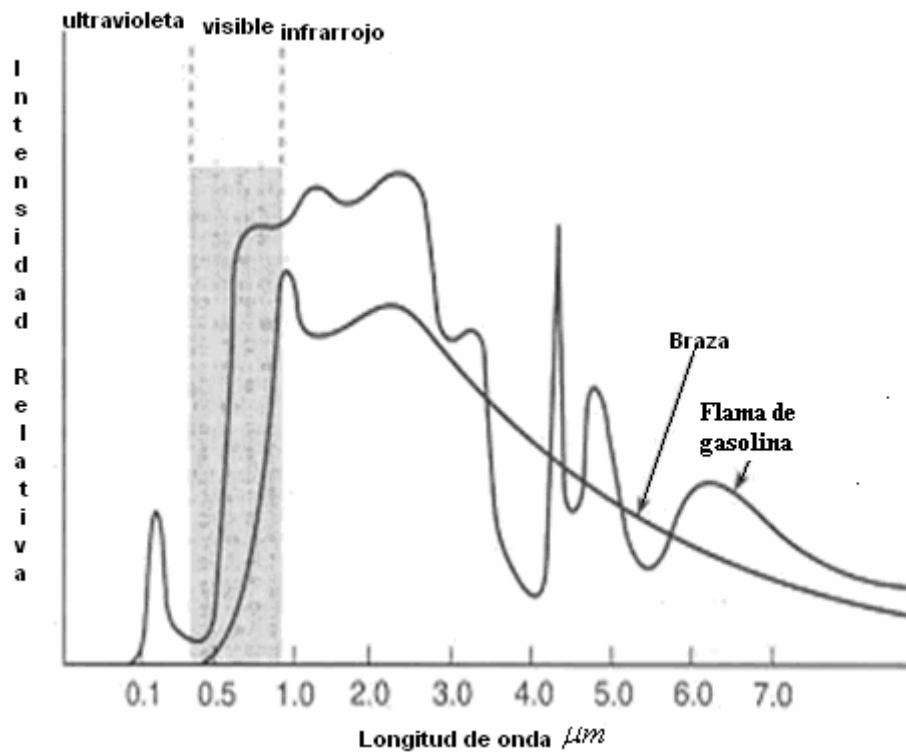


Figura 2.9 Emisión espectral de dos tipos de combustibles.

El detector debe igualar a la emisión radiante o firma del fuego o braza que se quiere detectar. Esto debe hacerse con cierto grado de precisión que no se requiere con otro tipo de detectores. En la figura 2.9 se puede observar dos tipos de firmas.

El esfuerzo para reducir alarmas no deseadas provenientes de fuentes de emisión de radiación diferentes al fuego o a la braza lleva a que se deben diseñar detectores que observen la emisión de una longitud de onda muy específica, la cual está únicamente asociada con el proceso de combustión de un combustible en particular. Esto generalmente lleva como resultado a detectores que registran un solo tipo de emisión radiante de una clase de combustible pero son virtualmente ciegos a otros fuegos o brazas provenientes de otros combustibles o materiales figura 2.10.

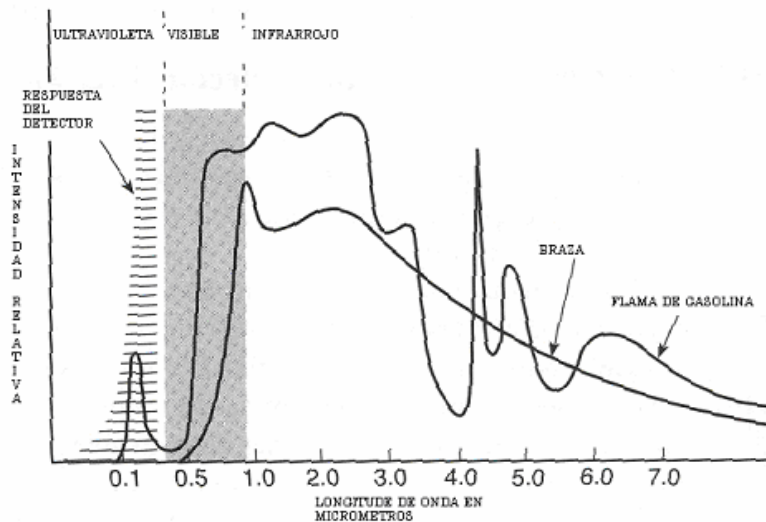


Figura 2.10. Respuesta espectral de un detector de flama ultravioleta superpuesta a un espectro.

Así se pueden tener sensores que detectan un solo tipo de emisión o múltiples tipos de emisión figura 2.11

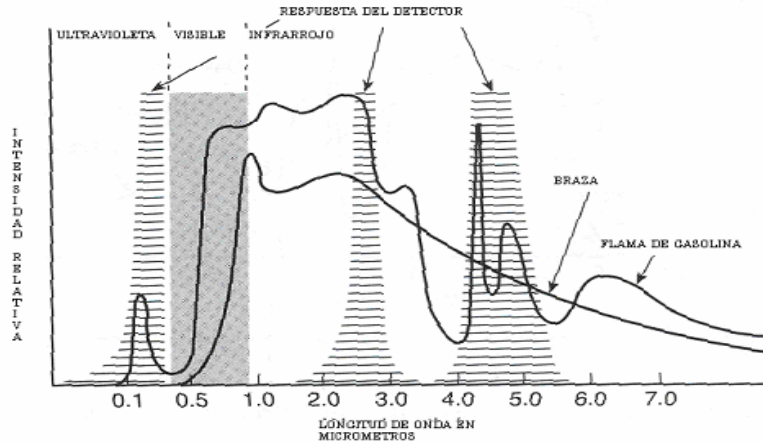


Figura 2.11 Respuesta espectral de un detector de flama ultravioleta/infrarrojo.

El tipo y cantidad de energía radiante que detecta un sensor de fuego o de braza será determinada considerando las características de desempeño del detector, un análisis de riesgos e incluyendo las características de fuego del combustible, la velocidad de crecimiento de este, las condiciones ambientales y el entorno.

La energía radiante de una flama o una braza puede estar en varias bandas, la ultravioleta, visible e infrarroja. Las cantidades relativas de la radiación emitida en cada parte del espectro están determinadas por la química del combustible, la temperatura y la velocidad de combustión.

La energía radiante emitida por una braza, esta determinada primeramente por la temperatura del combustible (ley de emisión de Plank) y la emisividad del combustible. La energía radiante de una braza es primeramente infrarroja y en menor grado visible. En general las brazas no emiten energía ultravioleta en cantidades significativas (0.1% de la emisión total) hasta que las brazas logran una temperatura de 1727°C o 2000K (3140°F). En la mayoría de los casos las emisiones están incluidas en la banda de $0.8\mu\text{m}$ a $2.0\mu\text{m}$, correspondiendo a una temperatura de aproximadamente 398°C a 1000°C .

La mayoría de los detectores tienen alguna forma de circuitería de calificación, la cual usan para distinguir entre señales legítimas, espurias o transitorias.

Las emisiones radiantes no son el único criterio a considerar. El medio entre el fuego y el detector es muy importante. Como se menciona en el primer capítulo diferentes longitudes de onda de la energía radiada son absorbidas con varios grados de eficiencia por materiales que están suspendidos en el aire o que se acumulan sobre la superficie óptica del detector.

Los detectores de braza son instalados primeramente con el fin de registrar chispas o brazas, que podrían, si se les permite continuar ardiendo, precipitar fuegos más grandes o explosiones. Los detectores de braza son instalados, típicamente, en alguna forma de ducto o banda transportadora para monitorear el paso de combustible. Usualmente, es necesario encerrar la porción de la banda transportadora en donde se colocan los sensores de braza, porque estos dispositivos generalmente requieren de un ambiente oscuro debido a que se han identificado fuentes extrañas de emisiones de radiación que interfieren con la estabilidad de los detectores de braza. Estas fuentes extrañas pueden ser:

Luz ambiente

Interferencia electromagnética

Descargas electrostáticas en el flujo de combustible

En la figura 2.12 se muestran aplicaciones típicas en donde se usan los sensores braza. Así los detectores de braza son comúnmente usados en ductos y bandas transportadoras para detectar brazas en algún tipo de sólidos en particular, según se van transportando a estos. En la figura 2.12 a) se muestra el concepto general de un detector de braza, en la figura 2.12 b) se ilustra la aplicación de un detector de braza para proteger un colector de polvo, en la figura 2.12 c) ilustra la protección de una banda transportadora.

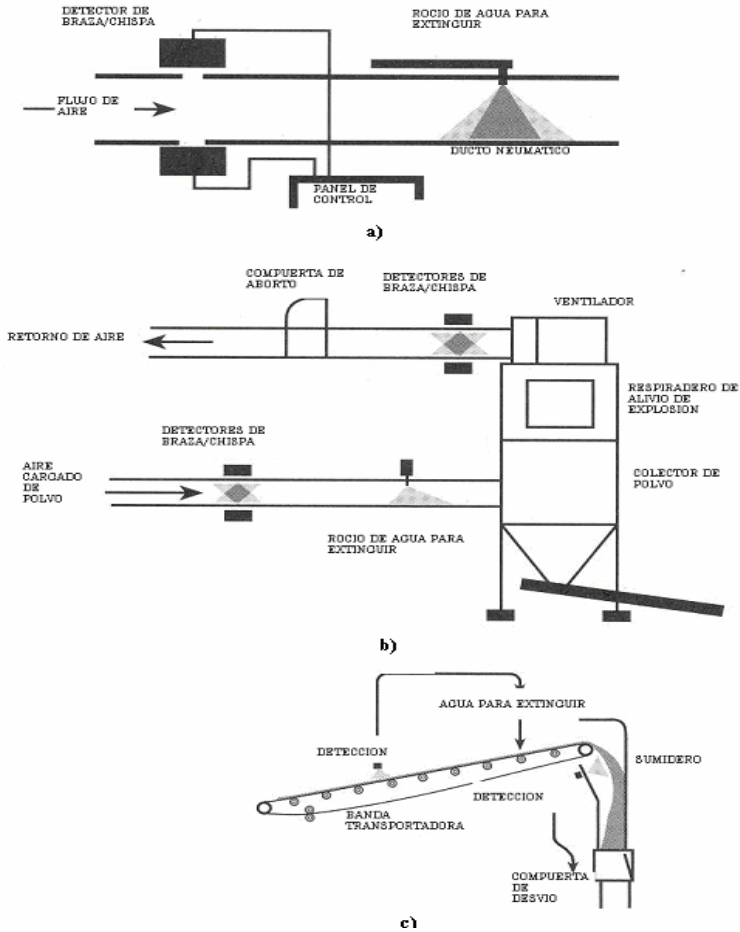


Figura 2.12 Aplicaciones de los sensores de braza/chispa

Actualmente, los detectores de braza están contruidos con fotodiodos de estado sólido o fototransistores para sensar la energía radiante emitida por las brazas; esta energía radiante típicamente se encuentra en el rango entre $0.5 \mu m$ y $2 \mu m$ en ambientes normalmente oscuros.

Como se ha mencionado anteriormente en este trabajo se diseñara un detector de braza basado en un microcantilever cuyas bondades ya se explicaron anteriormente.

Capítulo 3. Dispositivo y modelado

3.1 El microsensor infrarrojo

En este capítulo se desarrolla el modelado del microsensor infrarrojo y en los siguientes el diseño del lector de salida y la propuesta de construcción. Los pasos que se seguirán para el diseño y construcción del microsensor son parecidos a los utilizados en la fabricación de un microcircuito [26], los cuales se muestran en la figura 3.1.

Parecido a la fabricación de microelectrónica

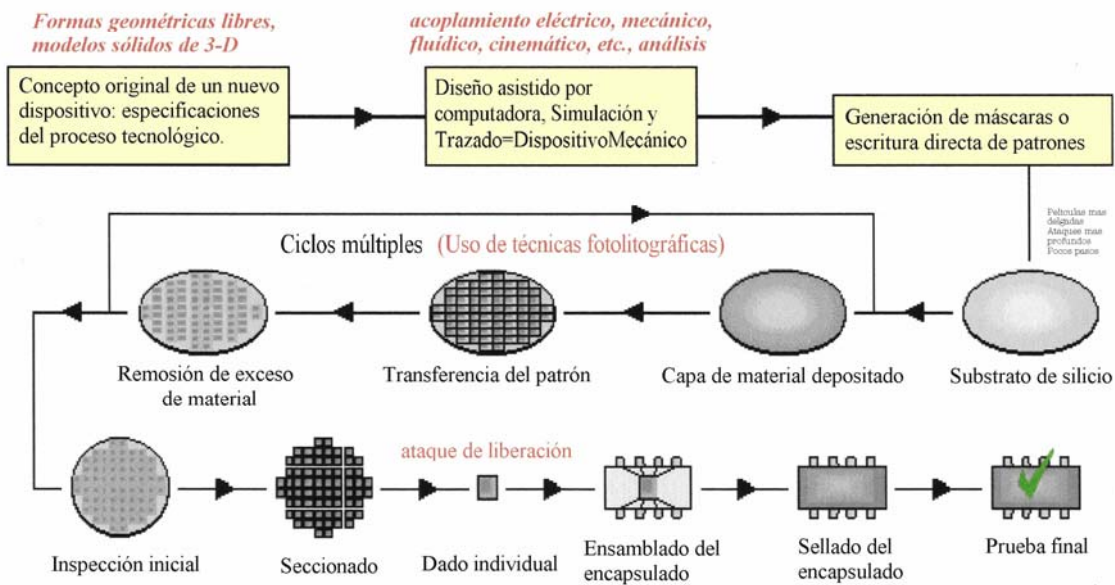
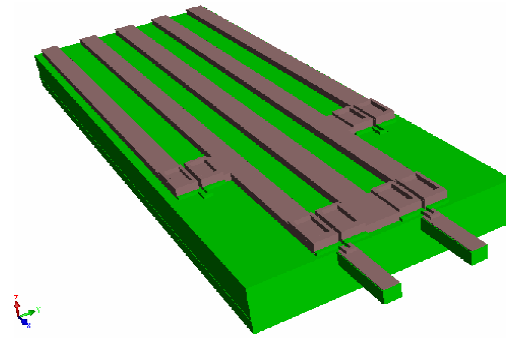
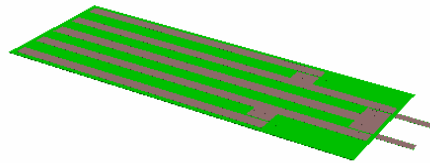


Figura 3.1 Comparación entre el flujo de proceso de los Circuitos integrados y de los MEMS.

Este microsensor estará construido con una estructura a base de microcantilevers como se observa en la figura 3.2.



a)



b)

Figura 3.2 Construcción de un par diferencial a base de microcantilevers.

- a) Dimensiones no a escala
- b) Dimensiones a escala

Aquí se presenta el procedimiento de diseño del microcantilever así como el comportamiento térmico, termomecánico y el análisis de ruido.

Para optimizar el desempeño del sistema, la selección del material, el diseño térmico, termomecánico y la óptica visible e infrarroja son temas importantes que requieren ser considerados concurrentemente [17] [18].

3.2. Materiales.

Los dos materiales para la manufactura del microcantilever que responden a la absorción infrarroja cumplen con los siguientes requisitos:

- a) Uno de los materiales absorbe radiación infrarroja en la longitud de onda de $0.8 \mu\text{m}$ a $2 \mu\text{m}$.
- b) Los materiales deben tener una gran desigualdad en los coeficientes de expansión térmica.
- c) Los materiales deben ser compatibles con los procesos de microfabricación.

- d) Las películas de los materiales deberán tener bajo esfuerzo residual para evitar que estos se deflexionen sin causa alguna.
- e) Los materiales poseen buena inactividad química.
- f) La conductividad térmica de uno de los dos materiales debe ser baja

Entonces, si se hace un proceso de deposición de vapor químico a baja presión (LPCVD) con materiales como nitruro de silicio (Si_3N_4) y aluminio (Al) se logran las características enumeradas anteriormente para construir un cantilever bimetalico. La tabla 3.1 nos muestra las propiedades del nitruro de silicio, del aluminio, del silicio y el oro para comparar.

Tabla 3.1 Propiedades de los materiales para el microcantilever

	Densidad $\rho \times 10^{-3}$	Modulo de Young $E \text{ GN} / m^2$	Cond. Termica., $\lambda \text{ W} / (mK)$	Coef. de expansión., $\alpha \text{ } [\times 10^{-6} K^{-1}]$	Capacidad Calorífica $c \text{ J} / kgK$
Si_3N_4	2.40	222	5.5 ± 0.5	0.8	691
Si	2.33	100	135	2.6	700
Au	19.30	73	296	14.2	129
Al	2.70	77	237	23.6	908

El aluminio y el nitruro de silicio muestran las grandes desigualdades deseadas en el coeficiente de expansión térmica $23.6/8 \approx 29$. Agregado a esto, el nitruro de silicio también tiene baja conductividad térmica, lo cual es critico para el aislamiento térmico.

Así, los mecanismos de transducción de un microcantilever están basado en los cambios de las propiedades de deflexión y resonancia inducidas por factores ambientales del medio en el cual un microcantilever esta inmerso. Es conocido que las propiedades físicas de la superficie son influenciadas por absorción molecular o por absorción de radiación, llevando esto a cambios en fuerzas de superficie (esfuerzo superficial). Si dos superficies de un cantilever son diferentes (bimaterial), la absorción de radiación infrarroja resultara en un esfuerzo diferencial entre la parte superior y la parte inferior de las superficies, debido a que existe un calentamiento en el

microcantilever y por lo tanto hay un esfuerzo inducido térmicamente tal bosquejo en el capítulo 2.

Entonces cuando la temperatura cambia, el microcantilever de bimetálico sufre una deflexión debido a las disimilitudes en la expansión térmica de los dos materiales que forman al microcantilever [2], [15], [27] ver Figura 3.3. Este fenómeno es frecuentemente referido como el “efecto bimetalico”. Ya se menciono previamente que el microcantilever de nitruro de silicio con un recubrimiento de aluminio en uno de sus lados sufre una deflexión medible en respuesta a un cambio mínimo de temperatura. En este caso en particular, el esfuerzo diferencial en el cantilever es creado debido a la disimilitud de la expansión térmica del substrato de nitruro de silicio y el recubrimiento de aluminio. Se estima que el cambio de temperatura mínimo que puede ser detectado por un microcantilever bimetálico es $\Delta T \approx (10^{-4} \square 10^{-5} \text{ K})$. Estos pequeños cambios de temperatura son los que provocan la deflexión y esta es la que nos indicara la existencia e intensidad del fuego debido a una braza o chispa.

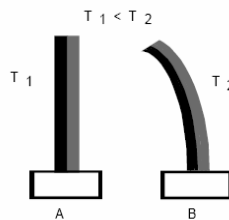


Figura 3.3. Transducción termo-mecánica. Esta es una aproximación muy simple que hace uso de los bimetálicos.

Cuando se considera la proporcionalidad entre la deflexión y la energía absorbida por el cantilever, la deflexión se puede obtener asumiendo que dQ/dt incide uniforme y espacialmente sobre el microcantilever bimetálico.

Ahora se habrá de obtener un **modelo** para poder calcular la deflexión del cantilever que es diseñado.

En la ausencia de fuerzas externas como la gravitacional, magnética o electrostática, la deformación del cantilever esta inequívocamente relacionada a el gradiente del esfuerzo generado en el dispositivo.

Dependiendo sobre el origen particular de este esfuerzo, pueden o no estar disponibles **modelos analíticos** [28] para el análisis cuantitativo de la respuesta del microcantilever. En nuestro caso existen modelos aplicables a los esfuerzos inducidos térmicamente y concomitantemente deformaciones de microcantilevers contruidos de dos capas de materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica. Evaluaciones teóricas de termostatos bimetálicos reportados por Timoshenko [27] nos dan una expresión analítica para el radio de curvatura de un cantilever bimetálico en función de un cambio de temperatura.

Para un microcantilever rectangular dos tipos de deformación ocurren, uno causado por el momento flexionante y el otro causado por las fuerzas cortantes.

Para hacer el análisis del microcantilever usaremos el momento flexionante ya que el cantilever no se encuentra sujeto a ninguna carga sino que la deformación se debe a los esfuerzos diferenciales inducidos por diferencia de temperatura.

Por lo tanto para poder lograr el diseño del microcantilever se requiere de un modelo de dicho dispositivo. Podemos tener diferentes métodos para resolver este problema.

Métodos

Método analítico

El método analítico [28] del problema consiste de ecuaciones algebraicas o ecuaciones diferenciales del problema, este tipo de aproximación es invaluable especialmente en el entendimiento de los efectos de variar las dimensiones o las propiedades de los materiales. La solución exacta de las ecuaciones diferenciales esta disponible para casos simples. Cuando la geometría, las condiciones fronteras y las cargas son complejas, es básicamente imposible encontrar una forma de solución cerrada.

Método de la mecánica analítica para sistemas continuos

Un método mecánico analítico puede ser el método de Rayleigh-Ritz, el cual propone resolver el problema usando una aproximación [28], una

solución admisible cinemáticamente, es decir una solución que satisfaga lo esencial de las condiciones frontera. En lugar de resolver la ecuación diferencial en forma exacta, el método de Rayleigh-Ritz sugiere usar una solución aproximada que se aplique en el dominio entero del problema. La solución está dada en la forma

$$u(x) \cong \phi + \sum_{i=1}^n c_i \phi_i(x)$$

y los coeficientes c_i son encontrados imponiendo el principio de la Energía Potencial Estacionaria ($\Rightarrow \partial \Pi / \partial c_i = 0$). La solución mejora si se usan más términos es decir si

$$n \rightarrow \infty.$$

Método numérico

Las tres principales categorías de la aproximación numérica para la solución de problemas mecánicos son: diferencias finitas (FDM), elemento finito (FEM) y elemento frontera (BEM) [28], [25]. Los tres métodos utilizan los siguientes pasos:

- Reemplazo de ecuaciones diferenciales por una aproximación de relaciones algebraicas.
- Definen un mallado computacional que describe la geometría del dominio de la solución. Las respuestas y condiciones fronteras son calculadas para estas mallas.
- Resuelven el conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas para determinar la respuesta en los puntos del mallado

Los métodos de elemento finito están basados en la realización de encontrar una “buena” solución en el dominio entero del problema, esto puede ser muy engorroso (lo cual lleva a este método al uso de una computadora). La estructura entonces es dividida en varios subdominios (los elementos) y se encuentra una solución aproximada para el desplazamiento de los campos dentro de cada elemento. En el límite, según el número de elementos tienda a infinito (y su tamaño infinitesimal), la solución deberá converger a una solución exacta.

En este trabajo se desarrolla un modelo partiendo de la forma analítica y para la simulación un modelo numérico.

3.3 Método Analítico Ecuación Euler-Bernulli

Se partirá de la ecuación de Euler-Bernoulli [29], que surge de la combinación de cuatro subconjuntos distintos de la teoría de vigas: las ecuaciones de definición **cinemática**, **constitutiva**, **fuerza resultante** y **equilibrio**.

La **cinemática** estudia la deflexión de la viga o sea el desplazamiento z fuera del plano, la distancia que recorre el plano neutral de la viga desde su posición de reposo (sin carga). El desplazamiento fuera del plano es generalmente acompañado por una rotación del plano neutral de la viga, definido como θ , y por una rotación χ de la sección de la viga figura 3.4

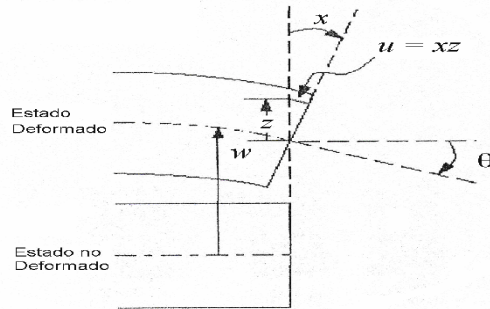


Figura 3.4 Desplazamiento fuera del plano del eje neutro

Lo que se requiere conocer realmente es el desplazamiento en la dirección x a través de una sección de la viga, $u(x, z)$, desde el cual se puede encontrar la deformación directa $\varepsilon(x, z)$ por la ecuación

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \tag{3.1}$$

para hacer esto se requiere que se hagan algunas asunciones sobre como justamente rota una sección. Para la viga de Euler, las asunciones fueron dadas por Kirchoff e indican como se comportan las “normales” (normales son líneas perpendiculares al plano neutral de la viga y están estas medidas en la sección transversal de la viga).

Asunciones de Kirchoff

1. Las normales permanecen rectas (no se flexionan)
2. Las normales permanecen sin estrecharse (mantienen la misma longitud)
3. Las normales permanecen normales (siempre hacen ángulo recto con el plano neutral)

Con las normales rectas y sin estrecharse, se puede asumir que existe una deformación despreciable en la dirección y . Junto con las normales permaneciendo normales al plano neutral, se pueden hacer explicitas las dependencias de x y y en $u(x, z)$ vía una simple expresión geométrica

$$z(x, y) = \chi(x) \bullet y \quad (3.2)$$

Con la dependencia explicita de x en u , se puede encontrar la deformación directa a través de la viga

$$\varepsilon(x, y) = \frac{d\chi}{dx} \bullet y \quad (3.3)$$

Finalmente, considerando también las normales siempre normales, se puede atar la rotación χ , de la sección transversal, a la rotación θ del plano neutral y eventualmente al desplazamiento z de la viga

$$\chi = -\theta = -\frac{dz}{dx} \quad (3.4)$$

La ecuación **constitutiva** describe como se relaciona el esfuerzo directo σ con la deformación ε dentro de la viga. Directo significa perpendicular a la sección transversal de la viga. Si se fuera a cortar la viga en un lugar dado, se encontraría una distribución de esfuerzo directo actuando sobre la cara de la viga ver figura 3.5

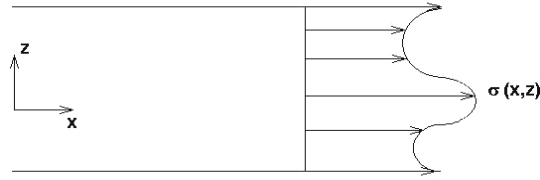


Figura 3.5 Esfuerzo directo.

La teoría de vigas usa típicamente la ecuación unidimensional de Hooke

$$\sigma(x, y) = E \cdot \varepsilon(x, y) \quad (3.5)$$

Nótese que el esfuerzo y la deformación son funciones de la sección transversal entera de la viga.

Las **fuerzas resultantes** son un medio conveniente para dar seguimiento al esfuerzo importante en una viga. Estos son análogos a los momentos y fuerzas de la teoría de la estática, en que su influencia se siente a través de toda la viga (en contraposición a lo que es justamente un efecto local). Su conveniencia yace en que estos son función únicamente de x mientras que los esfuerzos en la viga son función de x y y .

Si se fuese a cortar la viga en un punto x , se encontraría una distribución de esfuerzos directos $\sigma(y)$ y esfuerzos cortantes $\sigma_{xy}(y)$, figura 3.6.

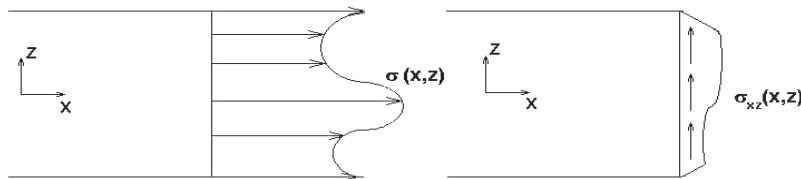


Figura 3.6 Fuerzas resultantes.

Cada porción pequeña de esfuerzo directo actuando sobre la sección transversal crea un momento alrededor del plano neutral ($y = 0$). Sumando estos momentos individuales sobre el área de la sección transversal se obtiene el momento resultante M , cuya definición es:

$$M(x) = \iint z \cdot \sigma(x, y) \cdot dy \cdot dw \quad (3.6)$$

donde w es la coordenada apuntando en la dirección del ancho de la viga (fuera de la página). Sumando los esfuerzos cortantes sobre la sección transversal da la definición de la resultante V ,

$$V(x) = \iint \sigma_{xy}(x, y) \cdot dy \cdot dw \quad (3.7)$$

Existe más de una fuerza resultante que se puede definir para la totalidad. La suma de todos los esfuerzos directos actuando sobre la sección transversal son conocidos como N ,

$$N(x) = \iint \sigma(x, y) \cdot dy \cdot dw \quad (3.8)$$

$N(x)$ es la fuerza directa total dentro de la viga en algún punto x aunque no juega un papel en la teoría (lineal) de vigas puesto que no causa un desplazamiento en z . Este tiene un papel en el desplazamiento axial de rodillos y barras.

Invirtiendo la definición de la fuerza resultante, podemos encontrar la distribución del esfuerzo directo en la viga debido a la flexión,

$$\sigma(x, y) = \frac{M_y}{I} \quad (3.9)$$

Nótese que el esfuerzo flexionante en la teoría de vigas es lineal a través del espesor de la viga. El máximo esfuerzo flexionante ocurre para el punto más alejado del eje neutral.

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad (3.10)$$

¿Que hay a cerca de los otros esfuerzos directos no lineales actuando sobre la sección transversal de la viga? El valor promedio del esfuerzo directo esta contenido en N y no contribuye a la teoría de vigas. El esfuerzo remanente (después de que el promedio y las partes lineales son abstraídas) es un esfuerzo auto equilibrante y lo es porque no contribuyen a M o N y por tanto no juegan un papel global. Por lo contrario, cargas auto equilibrantes están confinadas a tener únicamente un efecto localizado, como lo manda el principio de Saint-Venant.

Las **ecuaciones de equilibrio** describen como la viga lleva cargas de presión con sus esfuerzos internos. En lugar de tratar con estos mismos esfuerzos, se selecciona trabajar con las resultantes puesto que estas son funciones de x únicamente (y no de y).

Para cumplir con el equilibrio, se considera el balance de las fuerzas y momentos actuando sobre una pequeña sección de la viga, figura 3.7

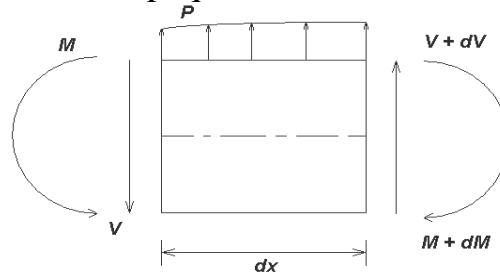


Figura 3.7 Fuerzas y momentos de equilibrio.

El equilibrio en la dirección z da la ecuación para la resultante cortante V ,

$$\frac{dV}{dx} = -p \quad (3.11)$$

El momento de equilibrio alrededor de un punto sobre el lado derecho de la viga da la ecuación para el momento resultante M ,

$$\frac{dM}{dx} = V \quad (3.12)$$

nótese que la presión de la carga p no contribuye al momento de equilibrio.

El resultado de cada uno de estos segmentos se resume a continuación

Cinemática: $\chi = -\theta = -\frac{dz}{dx}$

Constitutiva: $\sigma(x, y) = E \cdot \varepsilon(x, y)$

Resultantes: $M(x) = \iint y \cdot \sigma(x, y) \cdot dy \cdot dw$ $V(x) = \iint \sigma_{xy}(x, y) \cdot dy \cdot dw$

Equilibrio: $\frac{dM}{dx} = V$ $\frac{dV}{dx} = -p$

Para relacionar el desplazamiento w fuera del plano de la viga para la presión de carga p , se combinan los resultados de las cuatro subcategorías en el orden mostrado abajo [30],

Cinemática → Constitutiva → Resultantes → Equilibrio = Ecuación de Viga

Primero se combina las dos ecuaciones de equilibrio para eliminar V ,

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -p \quad (3.13)$$

Enseguida se reemplaza el momento resultante M con su definición en términos del esfuerzo directo σ ,

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[\iint y \cdot \sigma \cdot dy \cdot dw \right] = -p \quad (3.14)$$

Se usa la relación constitutiva para reemplazar σ por la deformación ε , y entonces se usa la cinemática para reemplazar ε en favor del desplazamiento normal w ,

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[E \iint y \cdot \varepsilon \cdot dy \cdot dw \right] = -p \quad \frac{d^2}{dx^2} \left[E \frac{d\chi}{dx} \iint y^2 \cdot dy \cdot dw \right] = -p \quad (3.15)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[E \frac{d^2 z}{dx^2} \iint y^2 \cdot dy \cdot dw \right] = p \quad (3.16)$$

Como paso final, reconociendo que la integral sobre y^2 es la definición del momento de inercia I del área de la viga,

$$I = \iint y^2 dy \cdot dw \quad (3.17)$$

lo que no permite llegar a la ecuación de Euler-Bernulli,

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI \frac{d^2 z}{dx^2} \right] = p \quad (3.18)$$

Donde p es la carga distribuida (fuerza por unidad de longitud) actuando en la misma dirección de z , E es el modulo de Young de la viga e I es el momento de inercia del área de la sección transversal de la viga

Esta ecuación nos define el desplazamiento fuera del plano z de una viga que esta gobernado por la ecuación Euler-Bernoulli

Esta misma ecuación la podemos representar por

$$\frac{d^2}{dx^2}[M] = p \quad (3.19)$$

donde

$$EI \frac{d^2 z}{dx^2} = M \quad (3.20)$$

Si E e I no varían con x a lo largo de la longitud de la viga entonces la ecuación de la viga se simplifica a

$$\left[EI \frac{d^4 z}{dx^4} \right] = p \quad (3.21)$$

Ahora si como se menciono se utilizara el modelo del momento flexionante Figura 3.8 en donde no existe la fuerza p , se tiene que la ecuación de la viga se simplifica a

$$\left[EI \frac{d^2 z}{dx^2} \right] = M \quad (3.22)$$

dos características importantes de un cantilever son la frecuencia de resonancia y la constante de resorte. En la ecuación 3.22 I esta dada por $\frac{wt^3}{12}$ para un cantilever rectangular con longitud igual a l . La constante de resorte se encuentra a través de la ley de Hooke

$$F = -kz(l) \quad (3.23)$$

Donde F es una fuerza actuante sobre el cantilever. Para esta fuerza actuando sobre el cantilever, el momento flexionante es $M = -F(l-x)$ y la ecuación 3.22 puede ser resuelta con un extremo fijo como condición frontera

$$z(0) = 0$$

$$\left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

La solución es

$$z(x) = \frac{Flx^2}{2EI} \left(1 - \frac{x}{3l}\right) \quad (3.24)$$

la flexión para el extremo libre es entonces

$$z(L) = \frac{l^3}{3EI} F \quad (3.25)$$

la constante de resorte

$$k = \frac{3EI}{l^3} = \frac{Ewt^3}{4l^3} \quad (3.22.a)$$

La frecuencia de resonancia se encuentra resolviendo la ecuación de la viga, balanceando el momento y las fuerzas lo que da

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0 \quad (3.26)$$

donde ρ es la densidad y A es el área de la sección transversal de la viga. La ecuación de la viga es resuelta con las condiciones frontera de un extremo fijo en $x=0$ y el extremo libre en $x=l$

$$z(0) = 0 \quad \text{y} \quad \left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$\left. \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right|_{x=l} = 0 \quad \text{y} \quad \left. \frac{\partial^3 z}{\partial x^3} \right|_{x=l} = 0$$

Esta ecuación tiene la solución

$$z(x,t) = z(x) \cos(\omega_n t + \theta) \quad (3.27)$$

con la parte espacial

$$z(x) = (\sin c_n l + \sinh c_n l)(\cos c_n x - \cosh c_n x) - (\cos c_n l \cosh c_n l)((\sin c_n x - \sinh c_n x))$$

donde

$$c_n^4 = \frac{\omega_n^2 \rho A}{EI} \quad (3.28)$$

relaciona al número de onda c_n con la frecuencia de resonancia ω_n . Aplicando las condiciones frontera nos da la ecuación característica del número de onda

EI

$$\cos(c_n l) \cosh(c_n l) + 1 = 0 \quad (3.29)$$

resolviendo esta para

$$c_n l = 1.875, 4.694, 7.855, \dots, 1, 2, 3, \dots$$

donde las soluciones representan diferentes modos resonantes, con $n=1$ siendo el modo fundamental. La frecuencia resonante es entonces

$$f_n = \frac{c_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.30)$$

substituyendo para $I = \frac{wt^3}{12}$ y $A = wt$

$$f_n = \frac{c_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.31)$$

$$f_n = \frac{(c_n l)^2}{2\sqrt{3}\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.32)$$

donde m es la masa $\rho l w t$ del cantilever. Así, la frecuencia de resonancia para el modo fundamental puede escribirse como

$$f_{res} = 0.1615 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{l^2} = 0.3231 \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.22.b)$$

Una vez encontrados los valores de la constante de resorte y la frecuencia del cantilever se resolverá la ecuación 3.22 para el modelo del momento flexionante, la ecuación 3.22 es una ecuación diferencial lineal de segundo grado, así que se espera una solución con dos constantes las cuales son fijadas por las condiciones frontera, este termino como se usa en resistencia de materiales generalmente se refiere a condiciones de esfuerzo, desplazamiento o pendientes en los extremos o bordes de un miembro, donde estas condiciones provienen aparentemente de las circunstancias del problema. Así que, para fijar las condiciones frontera de este diseño recurriremos a la figura 3.9

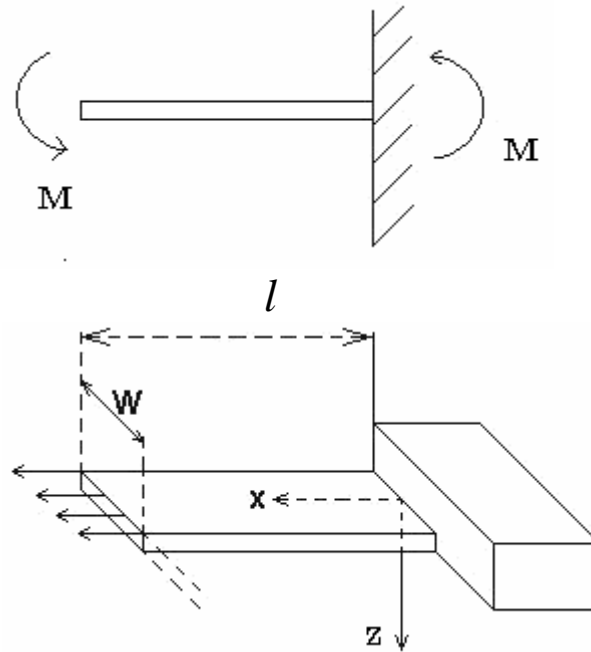
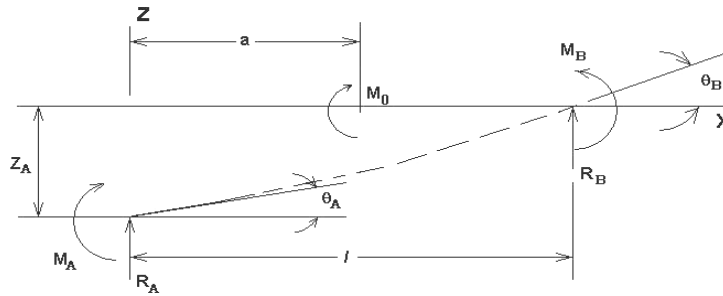


Figura 3.8 Modelo del momento flexionante.



Notación: M_0 = par aplicado (fuerza-longitud); R_A y R_B son las reacciones verticales en los extremos izquierdo y derecho, respectivamente, siendo hacia arriba positivos. M_A y M_B son los momentos de reacción en los extremos izquierdo y derecho, respectivamente. Todos los momentos son positivos cuando producen compresión sobre la porción superior de la sección transversal de la viga. La fuerza cortante transversal V es positiva cuando actúa hacia arriba en el extremo izquierdo de la viga. Todas las cargas aplicadas, pares y desplazamientos son positivos como se muestra. Todas las deflexiones hacia arriba son positivas y todas las pendientes son positivas cuando van hacia arriba y a la derecha [27].

Fig 3.9 Fuerzas cortantes, Momentos, pendientes y deflexión.

Dado que esta es una ecuación lineal, se resolverá encontrando una solución particular y entonces sumándole una solución homogénea de la forma $A+Bx$, resolviendo para A y B para satisfacer las condiciones frontera; se nota que el lado derecho es un polinomio de primer grado y debe ser la segunda derivada de z . Por lo tanto se asume que z es un polinomio de de tercer grado, así se puede resolver el problema:

$$z = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 \quad (3.33)$$

Nótese que esta forma ya incluye la solución homogénea la cual puede ser necesitada para cumplir con las condiciones fronteras.

Las condiciones frontera para la figura 3.9 caso general de aplicación de un momento en cualquier sección del cantilever son:

$$R_A = 0 \quad M_A = 0$$

$$\theta_A = \frac{-M_0(l-a)}{EI}$$

$$z_A = \frac{M_0(l^2 - a^2)}{2EI}$$

$$R_B = 0 \quad M_B = M_0$$

$$\theta_B = 0 \quad z_B$$

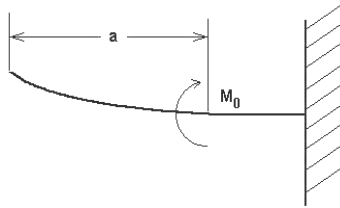


Figura 3.10 Momento intermedio concentrado

Entonces se tienen que buscar A, B C y D de tal forma que la ecuación 3.22 sea resuelta. Si se tiene que

$$\text{Fuerza transversal cortante} = V = R_A \quad (3.34)$$

$$\text{Momento flexionante} = M = M_A + R_A x + M_0 \langle x-a \rangle \quad (3.35)$$

Aunque el modelo supone la aplicación de un momento en el extremo libre del cantilever, las ecuaciones están dadas para la aplicación del momento en cualquier distancia de la longitud del cantilever. En estas ecuaciones la función escalón es usada por si misma y en combinación con funciones ordinarias.

La función escalón es denotada por $\langle x-a \rangle^0$ en donde el uso del paréntesis angular $\langle \rangle$ es definido de la siguiente manera: Si $x < a$, $\langle x-a \rangle^0 = 0$; si $x > a$, $\langle x-a \rangle^0 = 1$. Para $x = a$ la función escalón esta indefinida justamente como la cortante vertical esta indefinida directamente debajo de una carga concentrada. Así el uso del paréntesis angular $\langle \rangle$ esta extendido para el caso que involucra una potencia de la función escalón y la función ordinaria $(x-a)^n$, entonces la cantidad $(x-a)^n \langle x-a \rangle^n$ se puede representar como $\langle x-a \rangle^n$ y nuevamente dando un valor de cero si $x < a$ y es tratada en la forma normal si $x > a$.

Después de sustituir se encuentra que

$$\text{Pendiente} = \frac{dz}{dx} = \theta = \theta_A + \frac{M_A x}{EI} + \frac{R_A x^2}{2EI} + \frac{M_0}{EI} \langle x-a \rangle \quad (3.36)$$

$$\text{Deflexion} = z = z_A + \theta_A x + \frac{M_A x^2}{2EI} + \frac{R_A x^3}{6EI} + \frac{M_0}{2EI} \langle x-a \rangle^2 \quad (3.37)$$

se seleccionan valores máximos de momentos y deformación

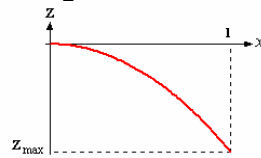
$$\text{Max } M = M_0$$

$$\text{Max } \theta = \theta_A; \text{ Valor máximo posible} = \frac{-M_0 I}{EI} \text{ cuando } a = 0 \quad (3.38)$$

$$\text{Max } z = z_A; \text{ Valor máximo posible} = \frac{M_0 I^2}{2EI} \text{ cuando } a = 0 \quad (3.39)$$

Ahora en la figura 3.11 podemos observar las graficas de las ecuaciones anteriores

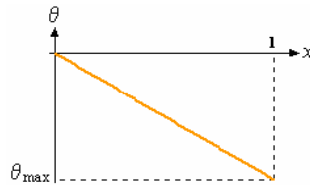
Desplazamiento



$$z(x) = -\frac{Mx^2}{2EI}$$

$$z_{\max} = z(l) = -\frac{Ml^2}{2EI}$$

Pendiente



$$\theta(x) = -\frac{Mx}{EI}$$

$$\theta_{\max} = \theta(l) = -\frac{Ml}{EI}$$

Figura 3.11 Desplazamiento, pendiente

Así, estas ecuaciones nos describen la deflexión y ángulo de un cantilever que es actuado en su extremo no soportado por un par aplicado el cual produce un momento flexionante, como se mostró en la figura 3.8. Ahora bien, el cantilever de este trabajo en realidad no está sujeto a ningún par aplicado externamente sino que la deformación es producto del esfuerzo producido en la superficie del cantilever debido al calentamiento de este al incidir la radiación infrarroja.

3.4. Comportamiento Termomecánico.

Para determinar la deflexión del microcantilever como función de un aumento en la temperatura, se deben resolver las ecuaciones termomecánicas que gobiernan un microcantilever bimaterial [23]. Determinemos estas ecuaciones en función de lo desarrollado en las secciones previas.

Entonces las ecuaciones 3.36 y 3.37 se deberán poner en función de la diferencias de temperaturas. Esto se muestra en la figura 3.12 que corresponde a la figura 3.9 en la cual T_1 y T_2 son las temperaturas de las superficies superior e inferior respectivamente y α es el coeficiente de expansión térmica y la figura 3.10 ahora se cambia a la figura 3.13.

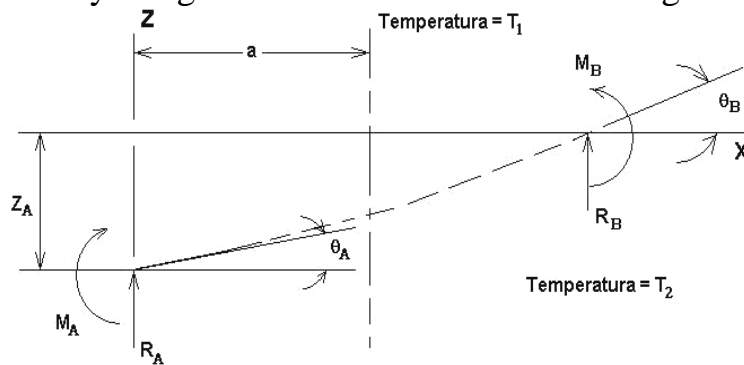


Figura 3.12 Fuerzas cortantes, momentos y deflexión.

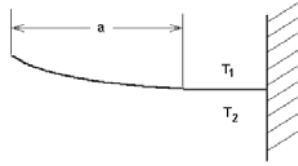


Figura 3.13 Deflexión debido a la diferencia de temperatura.

Lo que da la ecuación

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{1}{\rho_r} = \frac{M}{EI} \quad (3.40)$$

Donde ρ_r es el radio de curvatura del cantilever. Esta ecuación puede ser usada para calcular el esfuerzo térmico en el cantilever. Si se asume que la variación de la temperatura a través del espesor del cantilever sigue una ley lineal y que la temperatura no varía en planos paralelos a la superficie del cantilever. En tal caso, midiendo la temperatura con respecto a esa mitad de la superficie se puede concluir que la expansión y contracción de la temperatura son proporcionales a la distancia de la superficie media. Sea α el coeficiente de expansión lineal del material del cantilever y sea T la diferencia de temperatura de la superficie superior e inferior del cantilever. La diferencia entre la máxima expansión térmica y la expansión a la mitad de la superficie es $\alpha T/2$, y la curvatura resultante del calentamiento no uniforme puede encontrarse de la ecuación

$$\frac{\alpha T}{2} = \frac{t}{2\rho_r} \quad (3.41)$$

Donde t es el espesor del cantilever y así

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha T}{t} \quad (3.42)$$

igualando con la ecuación 3.40 se tiene

$$\frac{M}{EI} = \frac{\alpha T}{t} \quad (3.43)$$

Aquí se muestra que la temperatura produce un momento y está de acuerdo al modelo seleccionado.

Substituyendo 3.43 en 3.36 y 3.37 se tiene

$$pendiente = \theta = \theta_A + \frac{M_A x}{EI} + \frac{R_A x^2}{2EI} + \frac{\alpha}{t} (T_2 - T_1) \langle x - a \rangle \quad (3.44)$$

$$deflexion = z = z_A + \theta_A + \frac{M_A x^2}{2EI} + \frac{R_A x^3}{6EI} + \frac{\alpha}{2t} (T_2 - T_1) \langle x - a \rangle^2 \quad (3.45)$$

ahora las condiciones frontera son

$$R_A = 0$$

$$M_A = 0$$

$$\theta_A = \frac{-\alpha}{t} (T_2 - T_1) (l - a)$$

$$z_A = \frac{\alpha}{2t} (T_2 - T_1) (l^2 - a^2)$$

$$R_B = 0$$

$$M_B = 0$$

$$\theta_B = 0$$

$$z_B = 0$$

los valores máximos de momentos y deformación

$M = 0$ en cualquier lugar

$Max \theta = \theta_A$; Valor máximo posible = $\frac{-\alpha l}{t} (T_2 - T_1)$ cuando $a = 0$

$Max z = z_A$; Valor máximo posible = $\frac{\alpha l^2}{2t} (T_2 - T_1)$ cuando $a = 0$

Las ecuaciones anteriores, se han obtenido para una viga formada de un solo material; pero, como se menciono anteriormente, el cantilever de este trabajo esta formado por un substrato de nitruro de silicio recubierto por una película de aluminio, entonces se tiene una viga compuesta o bimaterial [14] [15].

Por lo tanto dado que el diseño del cantilever es para que se deforme cuando exista una diferencia de temperatura, se pueden usar las ecuaciones 3.44 y 3.45 para el modelo bimaterial, para hacer esto, el término $\alpha(T_2 - T_1)/t$ deberá ser reemplazado por el término 3.46 el cual permite incluir los dos materiales [27].

$$6 \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(T_2 - T_1)(t_1 + t_2)}{t_2^2 K_1} \quad (3.46)$$

Además, EI debe ser reemplazado por su equivalente $EI \rightarrow (EI)_{eq}$

$$(EI)_{eq} = \frac{wt_2^3 t_1 E_2 E_1}{12(t_1 E_1 + t_2 E_2)} K_1 \quad (3.47)$$

donde

$$K_1 = 4 + 6n + 4n^2 + \phi n^3 + \frac{1}{\phi n}; \quad n = \frac{t_1}{t_2}; \quad \phi = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.48)$$

substituyendo valores

$$K_1 = 4 + 6\frac{t_1}{t_2} + 4\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 + \frac{E_1}{E_2}\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^3 + \frac{E_2}{E_1}\frac{t_2}{t_1} \quad (3.49)$$

dando la ecuación

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = 6(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K_1} (T_2 - T_1)(x) \quad (3.50)$$

$$z = 0; \quad \frac{dz}{dx} = 0 \text{ para } x = 0,$$

Se asume que la temperatura es constante en cualquier sección transversal del cantilever, lo cual es razonable puesto que el cantilever es muy delgado comparado con su longitud y por tanto la perdida de calor por convección es despreciable.

La ecuación 3.50 puede ser resuelta para $z(x)$ y la deflexión del extremo del cantilever $z(0)$ podrá ser encontrada.

Ahora $(T_2 - T_1)(x)$ deberá ser determinada. Si la potencia esta distribuida uniformemente sobre el cantilever, el perfil de temperatura es

$$(T_2 - T_1)(x) = (l^2 - x^2) \frac{P}{2lw(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} \quad (3.51)$$

cuya grafica se muestra en la figura 3.14. Donde l y w son la longitud y ancho del cantilever bimaterial, t_1 y t_2 el espesor de los materiales, λ_1 y λ_2 , la conductividad térmica de los materiales y P la potencia total sobre el sensor.

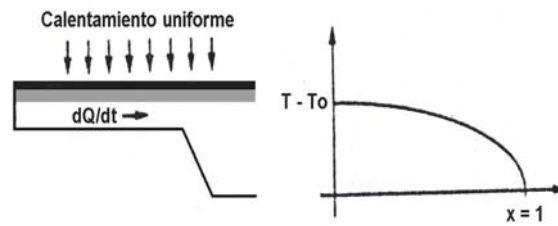


Figura 3.14. El calor es absorbido uniformemente a lo largo de la longitud total del cantilever, dando un perfil de temperatura parabólico.

Entonces la ecuación 3.50 es modificada a

$$z(0) = \frac{5}{4} (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K_1} \frac{l^3}{(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2) a} P \quad (3.52)$$

La potencia absorbida por el detector puede ser descrita como

$$P_{termica} = \eta \frac{dQ}{dt}$$

$$\eta \frac{dQ}{dt} = \eta L A_D A_S \varepsilon \sigma_{S-B} (T_S^4 - T_R^4) \quad (3.53)$$

donde $\frac{dQ}{dt}$ es la potencia incidente sobre el cantilever [8] [9], η es la fracción de la potencia absorbida, A_D el área efectiva del cantilever, L la

distancia entre cantilever y el emisor infrarrojo, A_s el área del emisor infrarrojo, ε emisividad del emisor infrarrojo, σ_{S-B} la constante de Stefan-Boltzmann, T_s es la temperatura del emisor infrarrojo y T_R es la temperatura base [9].

La ecuación 3.52 pasa a ser

$$z_{\max} = \frac{5}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K_1} \frac{l^3}{(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2) w} \eta \frac{dQ}{dt} \quad (3.54)$$

Substituyendo K_1 en la ecuación anterior

$$z_{\max} = \frac{5}{4} \frac{(t_1 + t_2) l^3}{(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2) w t_2^2} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \eta \left(\frac{dQ}{dt} \right)}{4 + 6 \left(\frac{t_1}{t_2} \right) + 4 \frac{t_1^2}{t_2^2} + \left(\frac{E_1 t_1^3}{E_2 t_2^3} \right) + \frac{E_2 t_2}{E_1 t_1}} \quad (3.55)$$

Esta ecuación es la que nos permite diseñar a un microcantilever desde el punto de vista **termomecánico**.

3.5. Esfuerzo inducido térmicamente

La deflexión de la viga también puede deberse al esfuerzo diferencial inducido por el cambio de temperatura [19] [15]. Entonces se obtendrá una expresión equivalente a la ecuación 3.55 para calcular la máxima deflexión del cantilever en función del esfuerzo diferencial, aunque el cantilever no tiene una deflexión circular cuando se presenta un esfuerzo superficial isotrópico, se puede encontrar que el radio de curvatura es una buena aproximación constante sobre su longitud en tanto que la deflexión Δz sea mucho mas pequeña que la longitud total del cantilever. El radio de curvatura debido al esfuerzo inducido en la superficie por la absorción de la radiación infrarroja se puede obtener usando la formula de “Stoney”; en 1905 Stoney derivó una relación entre el esfuerzo de superficie inducido por absorción y el radio de curvatura de un substrato delgado. Este primer análisis considera una bicapa consistente de una película y un substrato en el

cual el espesor de la película ($0.05 \mu m$) se asume infinitesimal comparada con el espesor del sustrato ($2.8 \mu m$). Esto lleva a que la deflexión de la bicapa ocurre en la presencia de esfuerzos residuales asimétricos y así se obtiene una solución para relacionar el esfuerzo σ en la película y el radio de curvatura R del sistema de tal forma que se obtiene la ecuación de Stoney 3.56.

$$\frac{1}{R} = 6 \left(\frac{1-\nu}{Et^2} \right) \Delta s \quad (3.56)$$

donde R es el radio de curvatura del cantilever, E es el modulo de Young para el sustrato, ν es la razón de Poisson, t es el espesor del cantilever, y Δs es el esfuerzo diferencial en el cantilever. Esta ecuación ha sido adoptada extensivamente. Cuando el espesor de la película no puede ser ignorado, los investigadores han tratado de mejorar la precisión de esta ecuación por medio de la inclusión de términos de mayor orden del espesor de la película en sus soluciones. Sin embargo los análisis siempre se inician con ciertas aproximaciones. Como resultado diferentes soluciones han sido derivadas. En el caso en el cual la película es mucho más delgada que el sustrato, que es el caso de este trabajo, la ecuación de Stoney (3.56) puede ser usada para calcular el radio de curvatura de la deflexión del cantilever figura 3.15, usando los parámetros físicos del cantilever.

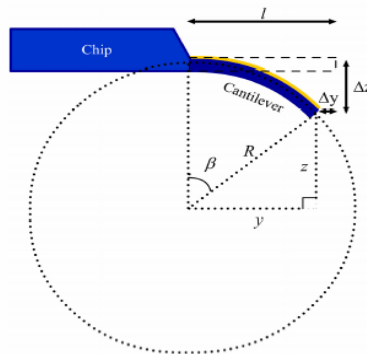


Figura 3.15 Radio de curvatura

Reemplazando las ecuaciones 3.47, 3.48, en la ecuación 3.56 para las dos películas (Al y SiN_x) se obtiene

$$\frac{1}{R} = \frac{6 \left(1 + \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \right)}{l(t_1 + t_2) \left[3 \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)^2 + \left(1 + t_1 \frac{E_1}{t_2 E_2} \right) \left(\frac{t_1^2}{t_2^2} + \frac{t_2 E_2}{t_1 E_1} \right) \right]} \frac{\Delta s}{E^*} \quad (3.57)$$

donde t_1 y t_2 son el espesor de la cubierta (al) y el sustrato de la microestructura (SiN_x), l es la longitud de de la microestructura, E_1 y E_2 son los módulos de Young de la cubierta y la microestructura, E^* es el modulo de Young efectivo de la microestructura cubierta. Nótese que $E^* = E_1 E_2 / (E_1 + E_2)$, entonces reemplazando esta expresión en 3.57 resulta

$$\frac{1}{R} = \frac{6 \left(1 + \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \right)}{l(t_1 + t_2) \left[3 \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)^2 + \left(1 + t_1 \frac{E_1}{t_2 E_2} \right) \left(\frac{t_1^2}{t_2^2} + \frac{t_2 E_2}{t_1 E_1} \right) \right]} \frac{\Delta s}{\frac{E_1 E_2}{(E_1 + E_2)}} \quad (3.58)$$

Ahora el radio de curvatura puede expresarse como

$$R \approx \frac{l^2}{2\Delta z} \quad (3.59)$$

entonces el desplazamiento máximo puede encontrarse a través de

$$z_{\max} = \frac{l^2}{(2R)} \quad (3.60)$$

la cual puede ser escrita como

$$z_{\max} = \left[\frac{3l}{t_1 + t_2} \right] \frac{6 \left(1 + \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \right)}{\left[3 \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)^2 + \left(1 + t_1 \frac{E_1}{t_2 E_2} \right) \left(\frac{t_1^2}{t_2^2} + \frac{t_2 E_2}{t_1 E_1} \right) \right]} \frac{\Delta s}{E^*} \quad (3.61)$$

El esfuerzo diferencial debido a la expansión térmica del microcantilever bimetalico puede aproximarse por [29]

$$\Delta s \approx (E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)l\Delta T \quad (3.62)$$

donde ΔT es el cambio de temperatura de la microestructura, α_1 y α_2 son los coeficientes de expansión térmica de los materiales que componen el microcantilever bimetalico. Midiendo la diferencia de temperatura entre el aluminio y el nitruro de silicio, se puede determinar z_{\max} , por medio de la ecuación:

$$z_{\max} = \left[\frac{3l^2}{t_1 + t_2} \right] \frac{\left(1 + \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \right)}{\left[3 \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)^2 + \left(1 + t_1 \frac{E_1}{t_2 E_2} \right) \left(\frac{t_1^2}{t_2^2} + \frac{t_2 E_2}{t_1 E_1} \right) \right]} \frac{E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2}{E^*} \Delta T \quad (3.63)$$

3.6 Sensibilidad termomecánica del cantilever

Se puede resolver la ecuación 3.55 para encontrar la sensibilidad termomecánica del cantilever $S_T = z_{\max} / \Delta T$. Así

$$S_T = \frac{z_{\max}}{\Delta T} = 3(\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{n+1}{K_1} \right) \left(\frac{l^2}{t_2} \right) \quad (3.64)$$

donde z es la deflexión del cantilever cuando $x=l$. Queda claro de esta ecuación que las expansiones térmicas deben ser muy diferentes. El valor optimo de n depende de E_1/E_2 . La ecuación (3.22) también indica que la longitud debe ser maximizada y el espesor del cantilever debe ser reducido.

3.7. Sensibilidad del microcantilever.

Si sustituimos los parámetros geométricos y las propiedades de los materiales en la ecuación (3.55) obtenemos la deflexión del microcantilever en función de los cambios de temperatura (3.63).

Este parámetro puede ser interpretado como la sensibilidad térmica del microcantilever [8],

$$\mathfrak{R}_T = \frac{z_{\max}}{\Delta T_{\text{gr}}} \quad (3.65)$$

Donde ΔT_{gr} es el aumento de temperatura causado por la radiación externa.

Si se optimizan los espesores relativos del nitruro de silicio y del aluminio, el valor de \mathfrak{R}_T puede incrementarse substancialmente.

Una vez que se define \mathfrak{R}_T , se requiere considerar el aumento de temperatura ΔT del microcantilever debido a la absorción de fotones. En este caso, el gradiente de temperatura a lo largo de la región bimaterial del microcantilever puede ser despreciado, porque en el caso ideal la microestructura y su base se encuentran a la misma temperatura. Esto también asume que toda la radiación incidente es absorbida por la microestructura y la base, resultando un cambio de temperatura uniforme. Esta asunción lleva a la solución de la ecuación de flujo de calor,

$$\Delta T_{\text{gr}} = \frac{\eta P_0}{G\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (3.66)$$

donde P_0 es la potencia radiada que cae sobre el cantilever, η es la absorbancia (fracción absorbida) de la potencia radiada, G es la conductancia térmica del principal mecanismo de pérdida, ω es la frecuencia angular de modulación de la radiación y τ es el tiempo de respuesta térmico. Este último está dado por

$$\tau = \frac{C}{G} = \left(\frac{cV}{G} \right) \quad (3.67)$$

donde c y V son el calor específico y el volumen del microcantilever.

La sensibilidad \mathfrak{R} de un detector infrarrojo se define como la señal de salida producida por unidad de potencia incidente. La sensibilidad se puede expresar en términos de Δz .

La sensibilidad a la radiación \mathfrak{R} de un detector térmico como lo es el microcantilever desarrollado en este trabajo se puede calcular usando las ecuaciones 3.55 y 3.58

$$\mathfrak{R}(\omega) = \frac{z_{\max}}{P_0} \quad (3.68)$$

De lo visto anteriormente se puede concluir que el desplazamiento z_{\max} puede ser maximizado diseñando el detector con la geometría adecuada y seleccionando adecuadamente los materiales de las capas bimaterial. Aunque el espesor de cada capa, tanto como la longitud total del cantilever, tienen un efecto dramático en la longitud del desplazamiento z_{\max} , la optimización del diseño del microcantilever no puede lograrse basado en la condición de máximo desplazamiento únicamente. Por ejemplo, la deflexión z_{\max} aumenta de acuerdo al cuadrado de la longitud del bimaterial l . Sin embargo, si aumenta la longitud del cantilever también aumenta el ruido termomecánico. Así los límites fundamentales del desempeño de un microcantilever son establecidos por las propiedades de la microestructura y también del método de la lectura de salida.

Este método de lectura es el objeto del siguiente capítulo.

Capítulo 4. Lector de Salida.

4.1. Lector piezorresistivo

En este capítulo se desarrollará el lector de salida, el cual está basado en un sensor piezorresistivo [21] [22].

La amplitud del desplazamiento de un microcantilever puede detectarse por diferentes medios de lectura de salida como ya se había mencionado anteriormente, dentro de estos se encuentra la detección óptica, la detección capacitiva, la detección de efecto túnel, o la detección interferométrica. Dentro de estos, la detección más común es la óptica en donde un haz láser es enfocado en el extremo final del microcantilever y la posición del haz reflejado es medido con un fotodetector. Existen varias desventajas en relación con estas técnicas. Primero se requieren dispositivos externos para la medición de la deflexión, como son un láser y fibras ópticas. En segunda, el alineamiento y la calibración de los elementos externos son requeridos periódicamente. Finalmente, el sobre dimensionamiento y requerimientos de energía para cada sistema de detección pueden exceder los requerimientos de campo. Estas desventajas pueden ser evitadas integrando los elementos de detección o dispositivos en el cantilever.

La piezorresistividad es una propiedad de los materiales donde la resistividad de volumen de un material es influenciada por el esfuerzo mecánico aplicado al material. Por ejemplo, cuando un material piezorresistivo tal como el silicio dopado es deformado, su conductividad eléctrica cambia. El cambio en la resistividad puede ser medido convenientemente por medio de un puente de Wheatstone. Los microcantilevers que contienen un lector de salida piezorresistivo, son ideales para detectar los cambios de esfuerzos en la superficie debido a la deflexión del microcantilever, así, estos no requieren de dispositivos externos de detección y pueden formar un sistema microelectromecánico integrado. En este trabajo se usará como lector de salida un elemento piezorresistivo.

Como se menciona en los renglones anteriores, de lo que se trata es de medir los cambios de esfuerzos en la superficie (esfuerzo en el plano) y es necesario encontrar una constante de resorte equivalente para este caso.

Para ilustrar un esfuerzo en la superficie de un cantilever que consiste de dos capas de espesores t_1 y t_2 , se considera que $t_2 > t_1$. La capa delgada tiene un esfuerzo en el plano σ como se muestra en la figura 4.1. En este caso existe una fuerza trabajando en el plano alrededor del eje neutral x del cantilever, pero aun existe un momento flexionante perpendicular al plano del dibujo.

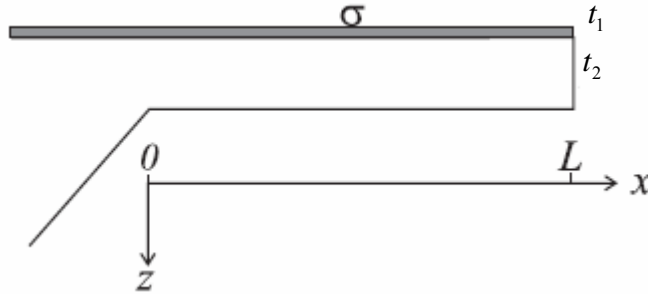


Figura 4.1 Esfuerzo σ sobre la capa delgada t_1 en la superficie del cantilever. El esfuerzo de superficie σ_s es introducido como $t_1\sigma$.

Así con $F = Wt_1\sigma$ y $M = Wt_1\sigma z$, donde $z = -t_2/2$ y puesto que $t_2 > t_1$, la ecuación 3.22 es resuelta nuevamente y la deflexión es ahora

$$z(x) = \frac{Wt_2x^2}{4EI}\sigma_s \quad (4.1)$$

donde el esfuerzo de superficie es introducido como $\sigma_s = t_1\sigma$. Esto aplica para un esfuerzo de superficie uniaxial a lo largo del eje x , pero lo que en realidad se tiene es un esfuerzo biaxial y así el modulo de Young biaxial es reemplazado por $E/(1-\nu)$ donde E es el modulo de Young y ν es la razón de Poisson del material del cantilever. La constante de resorte para el esfuerzo de superficie k_{σ_s} se define como

$$\sigma_s = k_{\sigma_s} z(l) \quad (4.2)$$

que esta dada por

$$k_{\sigma_s} = \frac{4EI}{(1-\nu)Wt_2l^2} = \frac{Et_2^2}{(1-\nu)3l^2} \quad (4.3)$$

4.2. Piezorresistividad.

Un material piezorresistivo cambia su resistencia cuando es deformado. La mayoría de los materiales cambian su longitud y su sección transversal cuando están sujetos a una carga y por tanto su resistencia, pero el cambio de resistencia de los materiales piezorresistivos es mayor que el que se logra por efectos geométricos. Cuando los efectos geométricos son omitidos, el cambio de la resistencia relativa por un piezorresistor se describe como

$$\frac{\Delta R}{R} = K_L \epsilon_L + K_T \epsilon_T \quad (4.4)$$

donde ϵ es la deformación y K_G es el factor de galga del material. Los subíndices L y T significan longitudinal y transversal con respecto a la dirección de la corriente que fluye en el resistor, véase figura 4.2 .

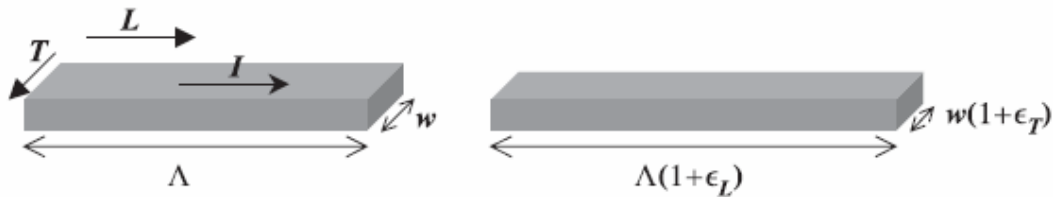
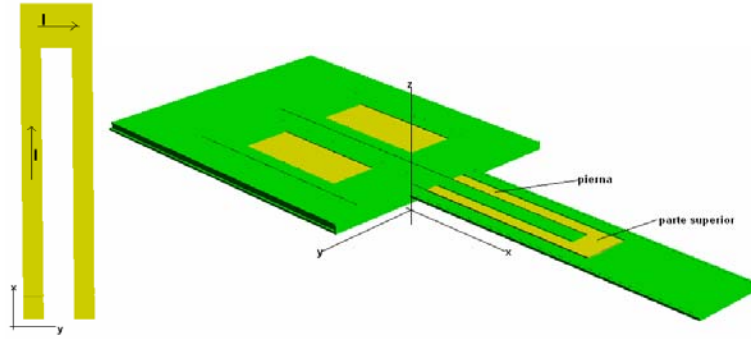


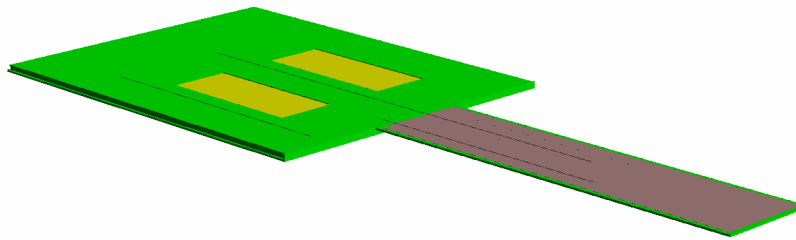
Figura 4.2 La dirección longitudinal es a lo largo de las líneas de corriente y la dirección transversal es perpendicular a las líneas de corriente. El resistor de la derecha se encuentra en tensión.

4.3 Geometría del piezorresistor.

La geometría del piezorresistor que se empleara se muestra en la figura 4.3, y se ubica sobre el cantilever [1] [22].



a)



b)

Figura 4.3 Geometría del piezorresistor. a) A la derecha se muestra el piezorresistor sobre el cantilever. I es la corriente que va sobre el resistor. b) en realidad el piezorresistor ira cubierto por una capa de nitruro de silicio y una de metal.

El resistor puede dividirse en dos regiones: Las piernas donde se asume que las líneas de corriente van a lo largo de la dirección x y la parte superior donde las líneas de corriente se asumen que van en la dirección y . De esto se deduce que la deformación en la dirección x de la pierna, se considera como la componente longitudinal de la deformación y la componente transversal de la deformación es la de la parte superior. Usando la ecuación 4.4 sobre las piernas y la parte superior del resistor separadamente, nos conduce a las siguientes relaciones:

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\text{pierna}} = K_L \varepsilon_x + K_T \varepsilon_y \quad (4.5)$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{\text{superior}} = K_L \varepsilon_y + K_T \varepsilon_x \quad (4.6)$$

El cambio de la resistencia relativa total experimentada por el resistor se encuentra por medio de las dos contribuciones de sus resistencias relativas

$A = \frac{R_{pierna}}{R_{total}}$ y $B = \frac{R_{superior}}{R_{total}}$ donde R_{pierna} es la resistencia de las dos piernas del resistor.

$$\frac{\Delta R}{R} = A \frac{\Delta R}{R} \Big|_{pierna} + B \frac{\Delta R}{R} \Big|_{superior} \quad (4.7)$$

$$= \varepsilon_x (AK_L + BK_T) + \varepsilon_y (AK_T + BK_L) \quad (4.8)$$

Un caso simple puede obtenerse cuando se desprecia la parte superior de la resistencia comparada con la resistencia total y esto es porque por diseño o por la alta concentración de dopado se puede hacer que $A \approx 1$ y $B \approx 0$.

4.4. Esfuerzo en el plano de un cantilever.

Un esfuerzo uniforme en el plano, como el medido en un detector infrarrojo se deberá resolver con $\sigma_x = \sigma_y$. Por tanto, la deformación en x y en y será igual a

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = (1-\nu) \frac{\sigma_x}{E} \quad (4.9)$$

significando que el radio de curvatura para el desplazamiento del cantilever es el mismo en x y y . $E/(1-\nu)$ se refiere al modulo biaxial.

El cambio relativo de resistencia o sensibilidad se encuentra introduciendo ε_x y ε_y en la ecuación 4.8. La tabla 4.1 resume los resultados del esfuerzo en el plano.

Tabla 4.1 Esfuerzo en el plano de un cantilever

σ_x
$\sigma_y = \sigma_x$
$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x(1-\nu)}{E}$
$\varepsilon_y = \frac{\sigma_x(1-\nu)}{E}$
$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_x [K_L + K_T]$

4.5. Polisilicio

Los piezorresistores sobre el cantilever deberán fabricarse de polisilicio con un dopaje de boro por el método de deposición de vapor químico a baja presión (LPCVD). Las propiedades del polisilicio están en función del dopaje, temperatura de deposición y de los subsecuentes tratados de recosido. El factor de galga y la resistencia del polisilicio depositado son dependientes del dopado y la temperatura [11]. La resistencia decrece con el dopado e igualmente el factor de galga ver figura 4.7. Una resistencia pequeña y un factor de galga grande son deseados para obtener una máxima sensibilidad.

4. 6 Señal mínima detectable.

Para poder estimar el desempeño de un sensor no es suficiente conocer la sensibilidad del sensor si no también la figura de merito que es la mínima señal que puede ser detectada con un valor requerido de la relación señal a

ruido. En el caso del lector de salida, la señal es el esfuerzo sobre la superficie del microcantilever.

4.7 El lector de salida

El cambio de resistencia del piezorresistor es convertido a un cambio de voltaje por medio de un puente de Wheatstone como puede verse en la figura 4.4.

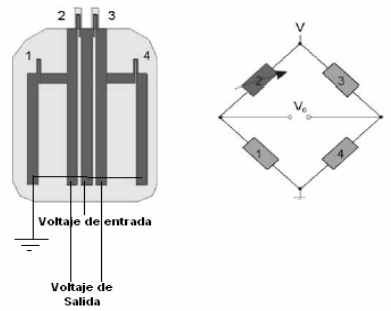


Figura 4.4 Cantilevers en configuración de puente de Wheatstone.

La salida de voltaje del puente de Wheatstone es

$$V_{out} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} V_{in} \quad (4.10)$$

Donde V_{in} es el voltaje de polarización [22]. De la figura 4.4 se puede ver que el sensor consta de cuatro piezorresistores: dos puestos sobre cantilevers y dos puestos sobre el sustrato. Con este diseño, uno de los cantilevers es un cantilever activo, el cual reacciona a la radiación infrarroja, midiendo la señal de interés; el otro cantilever es pasivo y sirve como referencia para filtrar las señales que son idénticas en ambos piezorresistores. Así lo que se está formando con este arreglo de cantilevers es un par diferencial mecánico

el cual permite realizar mediciones diferenciales y eliminar señales de modo común. Por ejemplo, estas señales de modo común pueden ser ruido mecánico o cambio de resistencia causado por desplazamientos de temperatura.

4. 8. Resolución.

La sensibilidad puede ser representada por $\frac{\Delta R}{R} \sigma_s^{-1}$. Esta es una medición del cambio relativo de la resistencia por unidad de desplazamiento z o por esfuerzo por unidad de superficie σ_s , respectivamente. Para poder encontrar el desplazamiento o esfuerzo mínimo de superficie detectable, se asume que el mínimo voltaje de salida detectable es igual a la señal de voltaje causado por el ruido $V_{out\ min} = V_{ruido}$, entonces de la ecuación 4.10 el desplazamiento mínimo detectable z_{min} y el esfuerzo de superficie mínimo detectable σ_{s_min} son

$$z_{min} = \frac{V_{ruido}}{\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} z^{-1} \right)} V_{in} \quad (4.11)$$

$$\sigma_{s_min} = \frac{V_{ruido}}{\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \sigma_s^{-1} \right)} V_{in} \quad (4.12)$$

Estas son las mediciones de la resolución del sensor con respecto del desplazamiento y esfuerzo de superficie. La naturaleza de los dos escenarios diferentes será expresada a través de la dependencia de $\frac{\Delta R}{R}$ sobre el esfuerzo.

4.9. Fuentes de ruido

Como fuente de ruido únicamente se considerara el ruido inherente del sensor. Esta fuente de ruido incluye el ruido termomecánico y dos fuentes de ruido eléctrico, el ruido de Johnson y el ruido $\frac{1}{f}$.

4.9.1 Ruido de Johnson

El ruido de Johnson es causado por las fluctuaciones térmicas de los portadores de carga. El voltaje de ruido de Johnson de un resistor con resistencia R esta dado por

$$V_j = \sqrt{4k_B TR \Delta f} \quad (4.13)$$

donde Δf es el ancho de banda medida, k_B es la constante de Boltzman y T es la temperatura absoluta.

4.9.2. Ruido $\frac{1}{f}$

El ruido $\frac{1}{f}$ es un ruido eléctrico que, se ha descrito mediante un modelo en el cual la densidad del ruido espectral S es inversamente proporcional al número de portadores N en el resistor y decrece para altas frecuencias.

$$S_{1/f} = \frac{\alpha_m V_s^2}{fN} \quad (4.14)$$

V_s es el voltaje aplicado, α_m es un parámetro del material y f es la frecuencia.

Se ha usado este modelo en cantilevers con piezorresistores de silicio y se ha confirmado la dependencia del número de portadores de carga. El parámetro α del material es muy dependiente del recosido y para silicio monocristalino el valor podría ser tan bajo como 10^{-6} - 10^{-5} .

El voltaje del ruido $\frac{1}{f}$, $V_{1/f}$ en el rango de frecuencia f_{\min} a f_{\max} se encuentra con

$$V_{1/f} = \sqrt{\frac{\alpha_m V_s^2}{N} \ln \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)}$$

(4.15)

4.9.3 Ruido termomecánico.

El ruido por deflexión z_v para el primer modo de vibración de un microcantilever es aproximadamente

$$z_v \approx \sqrt{\frac{k_B T}{k}}$$

(4.16)

Para encontrar la relevancia de este ruido cuando se usa un lector de salida piezorresistivo para medir el esfuerzo de superficie, este valor aproximado para la deflexión de ruido z_v es convertido a ruido de esfuerzo de superficie

$$\sigma_{sv} = k_{\sigma s} z_v = \frac{2EI}{wdL^2} z_v$$

(4.17)

Donde t_2^2 de la ecuación 4.3 es reemplazado por d , que es la distancia del piezorresistor al plano neutral del microcantilever. Si se asume una distribución de ruido blanco, el ruido inducido en el intervalo de frecuencia Δf es escalado como

$$\sigma_{sv\Delta f} = k_{\sigma s} \sqrt{\frac{k_B T \Delta f}{k f_{res}}}$$

(4.18)

Este es el valor para el peor caso, puesto que la energía vibratoria será concentrada alrededor de la frecuencia de resonancia. Si se considera la distribución de frecuencia, el ruido de deflexión fuera de resonancia se aproxima por

$$z_v \approx \sqrt{\frac{2k_B T \Delta \omega}{\pi k Q \omega_{res}}} \quad (4.19)$$

o un factor $\left(\frac{1}{2}\pi Q\right)^{\frac{1}{2}}$ mas bajo que la aproximación del ruido blanco y es obvio que el cantilever con un factor Q alto tendrá bajo ruido de vibración fuera de resonancia.

Esta contribución de ruido térmico es dependiente de la geometría y del ancho de banda medido. Para el sensor desarrollado en este trabajo se asume que el ruido térmico de esfuerzo de superficie no tiene influencia.

4.9.4 Ruido Total.

El ruido total promedio esta dado como

$$V_{ruido} = \sqrt{V_J^2 + V_{1/f}^2 + V_v^2} \quad (4.20)$$

donde el ultimo termino corresponde al ruido de vibración térmica y puede omitirse para la mayoría de las situaciones.

Para optimizar el desempeño del sensor piezorresistivo, se tiene que encontrar la deformación en el piezorresistor [21].

4.10 Esfuerzo en el plano

Ahora se encontrara la deformación $\varepsilon_{x_{res}}$ en el piezorresistor la cual puede ser insertada en las ecuaciones 4.8 y 4.12 para obtener el mínimo esfuerzo de superficie detectable.

La deformación en el cantilever se considera, que consta de un termino axial ε_0 dando una elongación/contracción y un termino dando la deformación cuando el cantilever se deflexiona βz así

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 + \beta z \quad (4.21)$$

donde z es la distancia a el eje neutral del cantilever. El esfuerzo es entonces

$$\sigma = \sigma_i + \varepsilon E_i \quad (4.22)$$

donde σ_i es el esfuerzo intrínseco de la i 'th capa, E_i es el modulo de Young de la i 'th capa del cantilever. Para obtener ε_0 y β se emplean las siguientes condiciones de equilibrio

$$F = \int \sigma dz = 0 \text{ y } M = \int z \sigma dz = 0 \quad (4.23)$$

donde F y M son la fuerza total y el momento flexionante por unidad de anchura, respectivamente. El origen del eje z es el plano neutral del cantilever y la posición de la punta del cantilever z_T se encuentra de

$$z_T = \frac{\sum_{i=0}^n E_i t_i h_i}{\sum_i E_i t_i} \quad (4.24)$$

donde t_i es el espesor de la i 'th y $h_i = \sum_{j=0}^i t_j - \left(\frac{t_i}{2}\right)$ es la distancia de la parte superior del cantilever a la mitad de la i 'th capa véase la figura 4.5

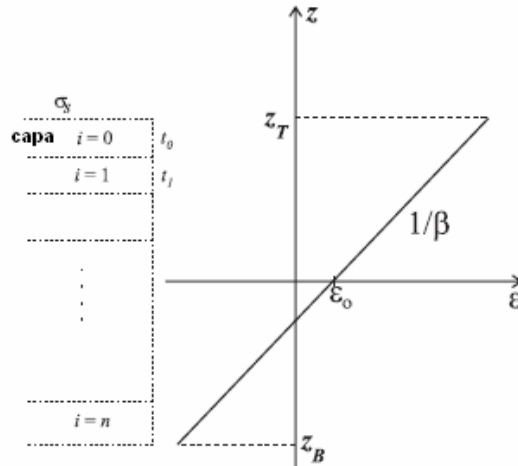


Figura 4.5 Distribución de la deformación a través del cantilever.

Las ecuaciones (4.23) ahora pueden ser escritas como una sumatoria en cada capa

$$F = \sum_{i=0}^n \sigma_i t_i + \varepsilon_0 \sum_{i=0}^n E_i t_i + \beta \sum_{i=0}^n E_i \frac{z_{iT}^2 - z_{iB}^2}{2} = 0 \quad (4.25)$$

$$M = \sum_{i=0}^n \sigma_i \frac{z_{iT}^2 - z_{iB}^2}{2} + \varepsilon_0 \sum_{i=0}^n E_i \frac{z_{iT}^2 - z_{iB}^2}{2} + \beta \sum_{i=0}^n E_i \frac{z_{iT}^2 - z_{iB}^2}{2} = 0 \quad (4.26)$$

donde z_{iT} y z_{iB} se refieren a la parte superior e inferior de la i 'th capa, respectivamente.

La deformación en función del esfuerzo intrínseco es entonces

$$\varepsilon_0 = - \frac{\sigma_s}{\sum_i E_i t_i} \quad (4.27)$$

$$\beta = - \frac{\sigma_s z_T}{\sum_i E_i t_i ((z_T + (t_i/2) - \sum_{j=0}^i t_j)^2 + \frac{1}{3} (t_i/2)^2)} \quad (4.28)$$

donde se ha usado una capa superior con esfuerzo $\sigma_s = \sigma_{\text{sup}} h_{\text{sup}} \neq 0$ cuando

$$\sigma_s = \sigma_{\text{sup}} h_{\text{sup}} \neq 0$$

$$h_{\text{sup}} \rightarrow 0.$$

$$z = 0$$

Es evidente que la deformación es únicamente una función de los materiales a través de E y del espesor de las capas, mientras el ancho y la longitud del cantilever no tienen influencia en la deformación.

4.11. Esfuerzo de superficie

El esfuerzo en el plano, considerado anteriormente, es causado por un esfuerzo de superficie uniforme en el cantilever. Los esfuerzos en todas las capas, excepto en la capa superior serán eliminados, puesto que lo que interesa es el cambio de deformación causado por un esfuerzo en la superficie y no la deformación por desplazamiento causado por el esfuerzo en el cantilever. El esfuerzo de superficie σ_s (con unidades de N/m) es introducido como $\sigma_s = \sigma_{\text{top}} t_{\text{top}} \neq 0$ como $t_{\text{top}} \rightarrow 0$. Con esto las expresiones para la deformación se reducen a

$$\varepsilon_0 = -\frac{\sigma_s}{\sum_i E_i t_i} \quad (4.29)$$

$$\beta = -\frac{\sigma_s z_T}{\sum_i E_i t_i \left(\left(z_T - \sum_{j=0}^i t_j + \frac{t_i}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{t_i}{2} \right)^2 \right)} \quad (4.30)$$

Se observa de la distribución de esfuerzos a través del cantilever (figura 4.5 y de las expresión anteriores para ε) que el plano neutral en $z=0$ definido a través de la ecuación 4.24 no esta libre de deformación cuando hay un esfuerzo intrínseco (aquí esfuerzo de superficie) en el cantilever. Si no que el plano neutral efectivo se desplaza de la superficie con el esfuerzo de superficie.

A continuación se muestra el diseño de la sensibilidad de un cantilever para medir el esfuerzo de superficie, usando un cantilever con una geometría rectangular.

4.12. Esfuerzo de superficie en un cantilever de una capa.

La deformación en un cantilever de una sola capa y con un esfuerzo de superficie sobre la superficie superior es

$$\varepsilon = -\frac{\sigma_s}{Yt} - \frac{6\sigma_s}{Yt^2} z \quad (4.31)$$

La deformación en la superficie superior ε_T y la deformación en la superficie inferior ε_B son entonces

$$z = t/2: \quad \varepsilon_T = -\frac{4\sigma_s}{Yt} \quad (4.32)$$

$$z = -t/2: \quad \varepsilon_B = -\frac{2\sigma_s}{Et} \quad (4.33)$$

Esto se ilustra en la figura 4.6

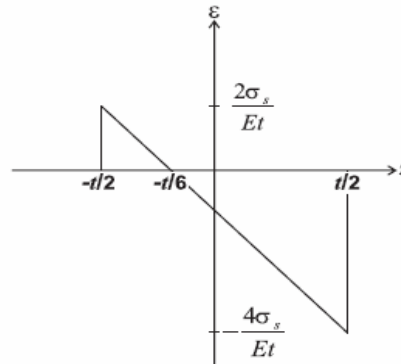


Figura 4.6 Deformación como función de la posición dentro de un cantilever simple con esfuerzo en la superficie. El esfuerzo de superficie esta en la parte superior de la superficie en $z = t/2$. El eje neutral efectivo donde $\varepsilon = 0$ esta en $z = -t/6$.

En la figura 4.6 también se muestra como el eje neutral efectivo es situado a $2/3$ alejado de la superficie en lugar de $1/2$ del espesor respecto de un cantilever libre de esfuerzo. La importancia de incluir el término de elongación/contracción ε_0 en la expresión para la deformación es ilustrada por el hecho de que constituye el 25% de la deformación en la superficie superior. En adición, si esta contribución fue omitida en una aproximación puramente de deflexión, el modelo deberá mostrar que la deformación es simétrica en el cantilever.

Para la estructura simple, la deformación en la superficie superior es tan alta como el doble de la deformación de la superficie inferior. La conclusión general para cualquier cantilever es que para obtener un gran cambio de resistencia y por tanto una sensibilidad alta, el piezorresistor deberá ser puesto lo mas cerca de la superficie y del esfuerzo de superficie aplicado, como sea posible.

Con un esfuerzo de superficie de igual magnitud sobre la parte alta y la parte baja de la superficie del cantilever, la deformación en el cantilever de una sola capa es

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = -\frac{2\sigma_s}{Y_t} \quad (4.34)$$

o la mitad de la deformación en la parte superior de la superficie con únicamente esfuerzo de superficie en un lado. En este caso de simetría el cantilever es únicamente estirado o contraído, pero en general el cantilever se deflexionará.

Para el caso general, el sensor más sensitivo es obtenido si se mide el esfuerzo diferencial entre los dos lados del cantilever, es decir en la práctica la tarea será que la radiación infrarroja incida únicamente en una superficie, mientras la otra superficie deberá ser totalmente inerte a esta radiación.

El diseño del cantilever y el piezorresistor considerando sus dimensiones se encuentra minimizando el esfuerzo de superficie, el cual fue discutido antes en la parte de resolución.

$$\sigma_{s_min} = \frac{V_{ruido}}{\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \sigma_s^{-1} \right) V_{in}} \quad (4.35)$$

Se usa como una aproximación el modelo de la tabla 4.1

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_x [K_L + K_T] \quad (4.36)$$

donde el esfuerzo $\varepsilon_x = \varepsilon_0 + \beta z$ ya se dio anteriormente.

Los últimos parámetros por determinar son los factores de galga. Como no es tarea sencilla cuantificar los esfuerzos de superficie, se usará la sensibilidad de la deflexión para determinar la relación entre la deformación y el cambio de resistencia con la ecuación

$$\frac{\Delta R}{R} z^{-1} \alpha [K_L (A - \nu B) + K_T (B - \nu A)] \quad (4.37)$$

El cambio de resistencia como función de los factores de galga está descrito para una fuerza que actúa sobre la punta del cantilever. El procedimiento es entonces deflexionar el cantilever a una distancia conocida z y registrar el

cambio de resistencia $\frac{\Delta R}{R}$. Con la aproximación de que la parte longitudinal de la resistencia es mucho más grande que la transversal ($A > B$), entonces $\Delta R/R \propto K_L - \nu K_T$. Si la contracción de Poisson ($\epsilon_T = -\nu \epsilon_L$) es ignorada entonces $\Delta R/R \propto K_L$. De la figura 4.7 se puede ver que el factor de galga longitudinal esta entre 20 y 30 y que para la mayoría de las concentraciones de dopado, el factor de galga longitudinal es de 2 a 3 veces mas grande que el factor de galga transversal []. Esto soporta la presunción de que $K_L - \nu K_T \approx K_L$. Los valores encontrados de estas pruebas y que han sido reportados en la literatura, dan $K_L = 20-30$, dependiendo de la concentración de dopado y del tratamiento de recocido.

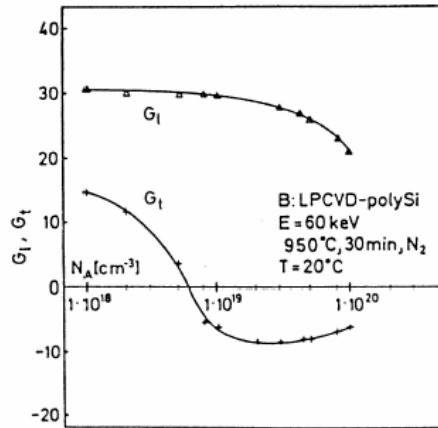


Figura 4.7 Factor de galga longitudinal y transversal para el polisilicio dopado con boro

Tomando en cuenta esta presunción, la sensibilidad para el esfuerzo de superficie en la ecuación (4.37) esta dado por

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon_x K_L \tag{4.38}$$

donde R esta dada por

$$R = 2 \frac{\rho \lambda}{t_r w_r} + \frac{\rho w}{t_r \lambda_t} \tag{4.39}$$

para una deflexión z . La K efectiva resulta de la combinación de los efectos longitudinal y transversal y esta dada por

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{(1 - \lambda / 2l) l t_{NR} k}{EI} z \quad (4.40)$$

donde t_{NR} es la distancia entre el eje neutro y la parte media de la resistencia.

Los parámetros de ajuste disponibles cuando se minimiza $\sigma_{s \text{ min}}$ se detallan en la figura 4.8.

Incluyen los espesores de las películas delgadas y las dimensiones del cantilever y el resistor. Los parámetros usados se dan en la tabla 6.2

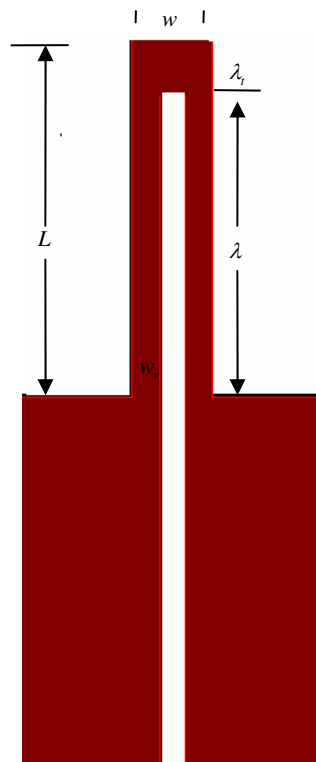


Figura 4.8 Geometría del piezorresistor del microcantilever. Se muestra la sección transversal del cantilever y las dimensiones del piezorresistor.

Esto nos da los seis parámetros de ajuste:

$$t_{ni\ superior}, t_{ni\ inferior}, t_{poli}, w_r, \lambda \text{ y } \lambda_t$$

Para este diseño únicamente se determinara el espesor del piezorresistor t_{poli} y se darán las dimensiones de los otros parámetros basados en el proceso a usar.

Capítulo 5. Geometría, trazado y mascarar.

5.1 Flujo del proceso.

En este capítulo se describirá el flujo del proceso para la construcción del cantilever [1].

El cantilever piezorresistivo es para fabricarse sobre una oblea de silicio de 4" y $350\text{m}\mu$ de espesor, pulida sobre los dos lados usando una serie de definiciones sobre el frente de esta (micromaquinado de superficie) [1] [4] [5] ver figuras 5.1 y 5.2.

A continuación se muestra el flujo de fabricación por medio de una descripción y una serie de figuras y diagramas.

- Limpieza de la oblea con RCA

Se usa antes de procesar la oblea en el cuarto limpio y antes de cualquier proceso de horneado.

RCA (15 minutos) para remover contaminación orgánica residual

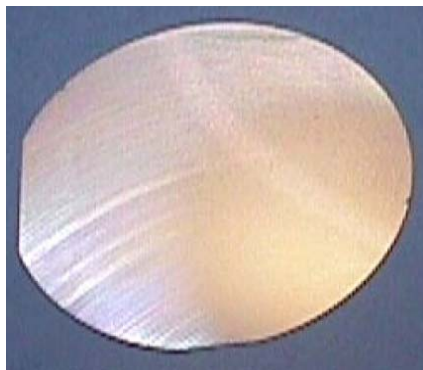


Figura 5.1 Vista de una oblea

Obleas de Silicio:

Obleas de Si para micromaquinado:

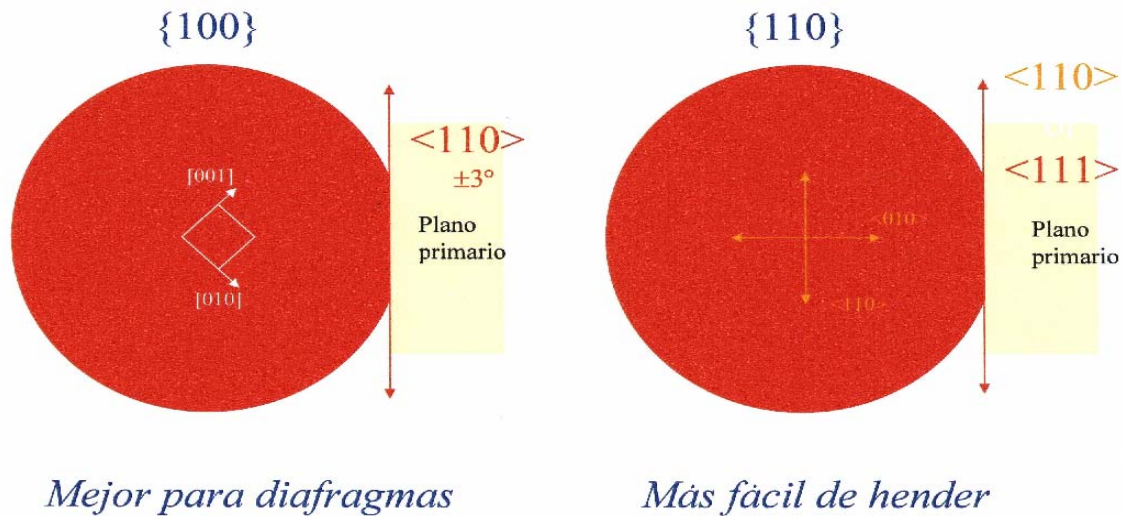


Figura 5.2 Orientaciones cristalográficas usadas en MEMS.

A continuación se hace una serie de depósitos de películas delgadas y ataques sobre la oblea para crear los cantilevers. La figura 5.3 muestra el número de deposiciones y ataques que deben realizarse.

Number	Step Name	Action	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photoresist	Etch Depth	Mask Offset	Sidewall Angle	Comments
0	Substrate	Substrate	Substrate	SILICON	5	GND					
1	Stack Material	Stack Material	aisla	OXIDE	0.05						
2	Conformal Shell	Conformal Shell	sacrificio	PSG	2						
3	Straight Cut	Straight Cut				m0	-	0	0		
4	Conformal Shell	Conformal Shell	nitro1	SI3N4	2						
5	Straight Cut	Straight Cut				m1	+	-2	0		
6	Conformal Shell	Conformal Shell	nitro2	SI3N4	0.5						
7	Straight Cut	Straight Cut				m2	+	0	0		
8	Conformal Shell	Conformal Shell	poly	POLYSILICON	0.2						
9	Straight Cut	Straight Cut				m3	+	-1	0		
10	Conformal Shell	Conformal Shell	nitro3	SI3N4	0.3						
11	Straight Cut	Straight Cut				m4	+	0	0		
12	Straight Cut	Straight Cut				m5	-	0	0		
13	Conformal Shell	Conformal Shell	metal1	ALUMINUM	0.5						
14	Straight Cut	Straight Cut				m6	+	0	0		
15	Conformal Shell	Conformal Shell	metal2	ALUMINUM	0.05						
16	Straight Cut	Straight Cut				m7	+	-2	0		

Figura 5.3 Numero de deposiciones (8) y numero de mascarar (7) usadas para el ataque.

Se describen a continuación los materiales depositados y su método de deposición, así como la descripción de las mascarar para la construcción del microsensar.

- Deposito de una capa de oxido.

Se oxida la superficie de la oblea para tener una capa de oxido de $0.05\mu m$ la cual sirva de aislante entre la oblea y la estructura que se fabricara sobre esta.

- Deposito de una capa de sacrificio.

Se deposita una capa de PSG (fosfosilicato de vidrio) con espesor de $2\mu m$ por el método de deposición LPCVD, la cual tiene como objeto sostener a los microcantilevers mientras se construyen estos.

- Deposito de foto-resina y trazado de la capa de sacrificio con la mascara m0



Figura 5.4. Mascara m0 para definir la capa de sacrificio que sirve de sostén a los microcantilevers.

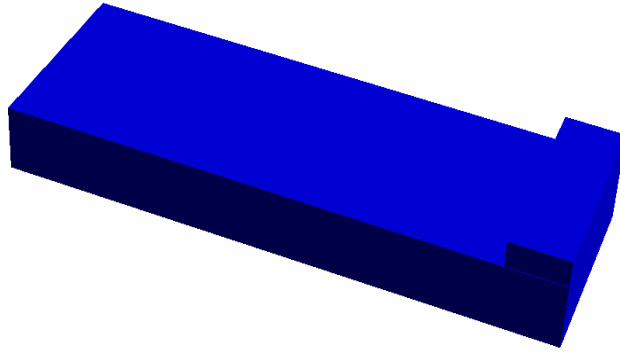


Figura 5.5 Trazado de la capa de sacrificio

- Deposito de nitruro de silicio.

El deposito de nitruro de silicio deberá ser por el método de CVD (Deposición de vapor químico).

En este método de deposición se introducen reactantes gaseosos en una cámara con temperatura elevada. Los reactantes reaccionan y se depositan sobre el sustrato.

El método CVD resulta dependiente de la presión, gas y temperatura. Para este cantilever deberá usarse una variante del método CVD llamado LPCVD (Deposición de vapor químico a baja presión). Porque el nitruro de silicio depositado por LPCVD tiene características como el de ser estequiométrico, soportar esfuerzo de alta tensión, los límites del espesor de la película depositada puede ser mejorada por películas ricas en silicio, denso, bueno para mascarar o capas de pasivación que son las características que se requieren para el cantilever.

El nitruro depositado por el método PECVD (Deposición de vapor químico plasma aumentado) tiene características como son la de tener esfuerzos de baja tensión y baja densidad.

El nitruro de silicio frecuentemente se deposita por medio del silano (SiH_4) o diclorosilano ($SiCl_2H_2$) y amonio (NH_3) de 700 a 900 °C

En este caso se depositara una capa de nitruro de silicio de $2\mu m$.



Figura 5.6 Cámara de deposición CVD

Una vez depositada la primera película de nitruro de silicio continua el flujo.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m1

De la figura 5.7 podemos observar que una vez que se ha depositado la primer capa de nitruro de silicio de $2\ \mu\text{m}$, se realiza un ataque usando la mascara 1 (m1) [25] ver figura 5.7 y 5.8.



Figura 5.7 Mascara m1 para definir el anclaje de los microcantilevers.

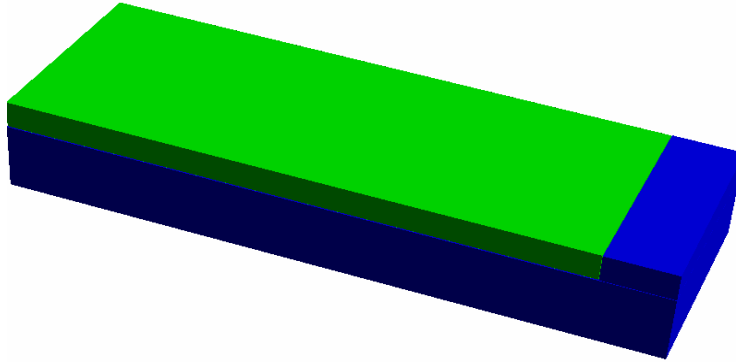


Figura 5.8 Anclaje de nitruro de silicio para los microcantilevers definido por la mascara m1.

- Deposito de nitruro de silicio

Se deposita una segunda capa de nitruro de silicio de $0.5\mu\text{m}$ para formar la primera parte de los microcantilevers, la cual servirá de soporte a los piezorresistores.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m2

Una vez depositada la segunda capa de nitruro de silicio se ataca esta usando la mascara m2 para formar la primera parte de los microcantilevers ver figura 5.9 y figura 5.10.

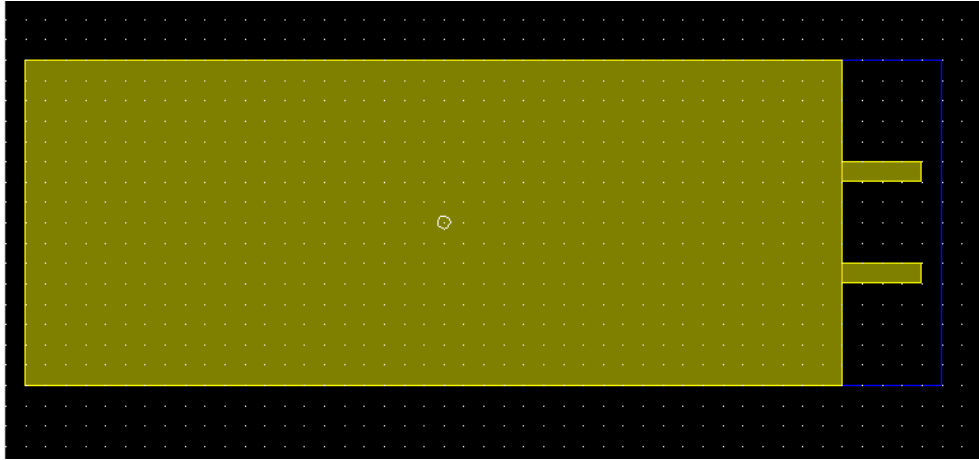


Figura 5.9 Mascara m2 para trazar los microcantilevers

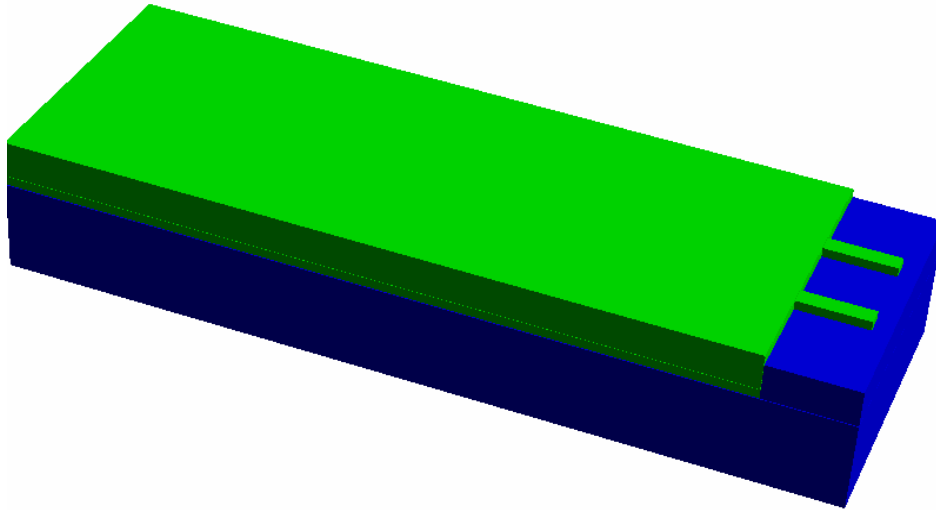


Figura 5.10 Trazado de los microcantilevers en el nitruro de silicio

- Deposito de polisilicio

Para los piezorresistores se deposita una capa de polisilicio de $0.2 \mu m$ por LPCVD.

Se dopa en un horno con boro para obtener una concentración de dopantes de $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

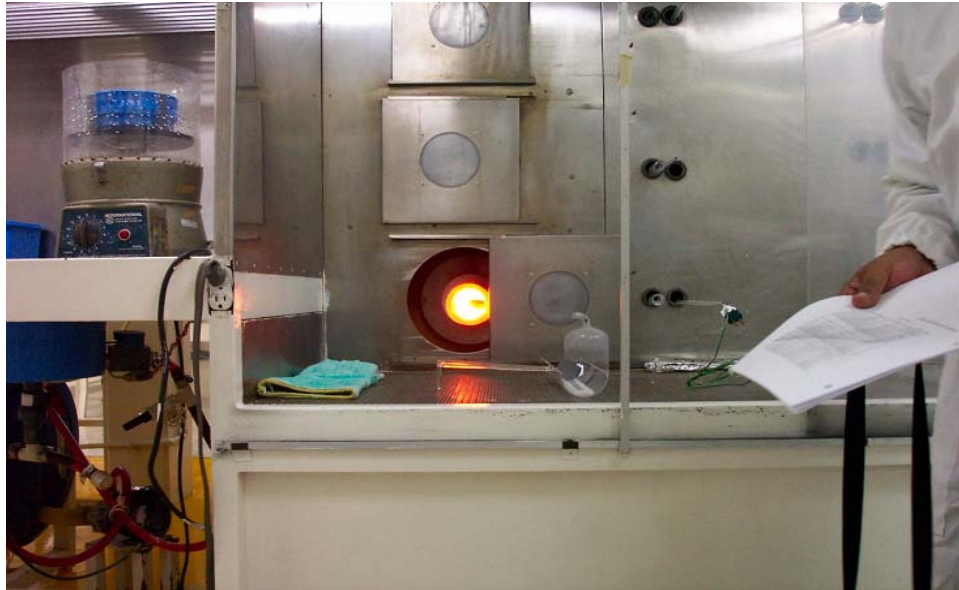


Figura 5.11. Horno de difusión de boro.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m3

Una vez hecho el dopaje se ataca el polisilicio con la mascara m3, figura 5.12, obteniéndose los piezorresistores, figura 5.13.

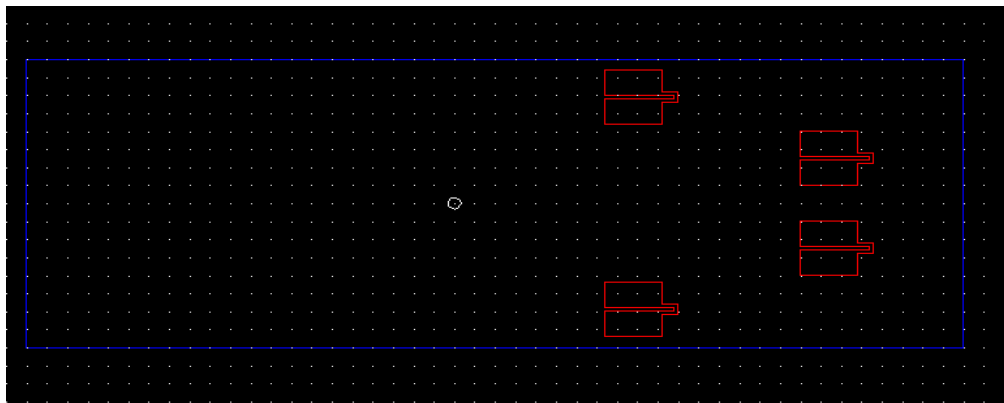


Figura 5.12 Mascara m3 usada para definir los piezorresistores

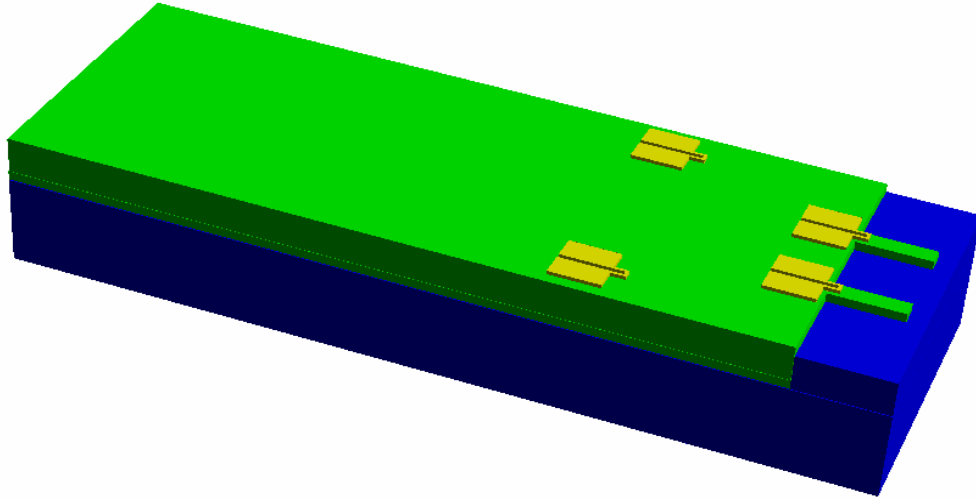


Figura 5.13 Vista del trazado de los sensores piezorresistivos después del tercer ataque.

- Deposito de nitruro de silicio

Se deberá realizar una tercera deposición de nitruro de silicio de $0.3 \mu m$ bajo las mismas condiciones del primer deposito para que el sensor piezorresistivo quede embebido dentro del microcantilever.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m4

Una vez depositada la segunda capa de polisilicio se ataca esta usando la mascara m4, figura 5.14, se obtendrán nuevamente los microcantilevers figura 5.15.

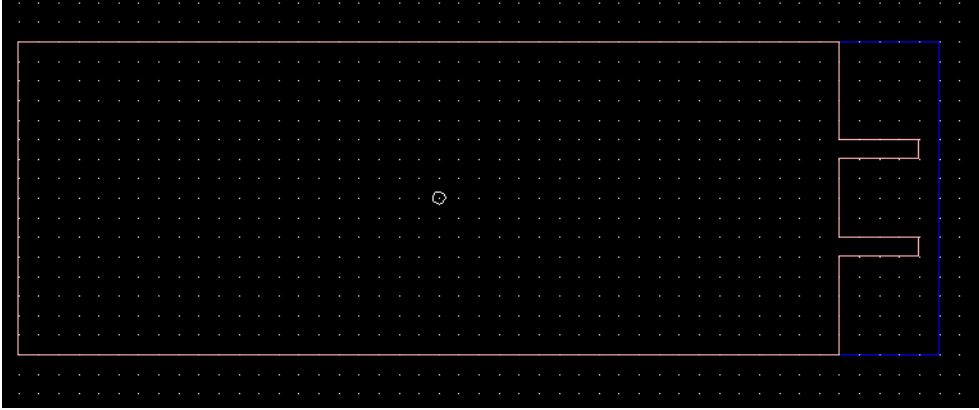


Figura. 5.14 Mascara m4 usada para definir los microcantilevers completos.

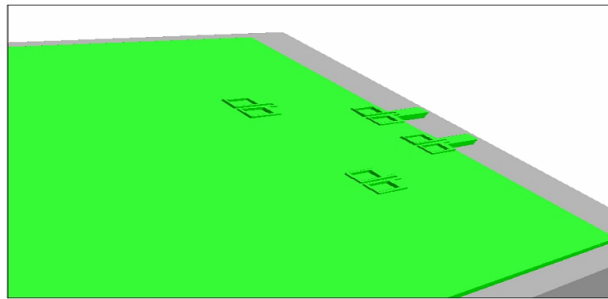


Figura 5.15 Vista del trazado de los microcantilevers después del tercer depósito de nitruro de silicio y del ataque de este.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m5

Una vez redefinidos los microcantilevers se ataca el área de contacto de los piezorresistores a través de la capa de nitruro de silicio, con empleo de la mascara m5.

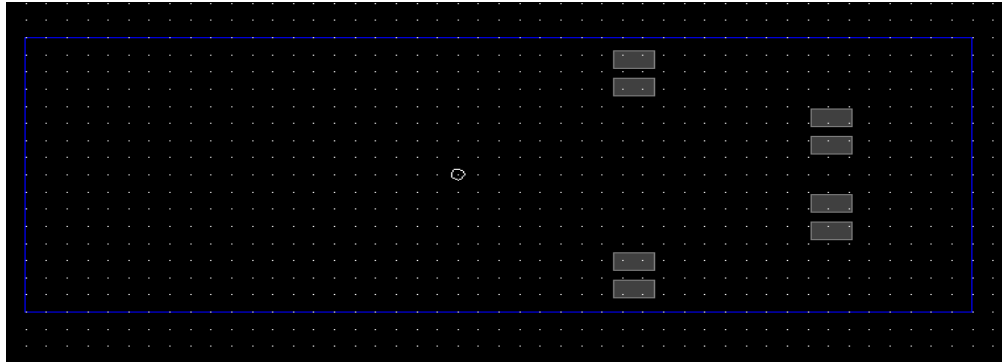


Figura 5.16 Máscara m5 para definir las áreas de contacto de los piezorresistores.

dando como resultado un área libre de nitruro de silicio para realizar el contacto con las líneas de alambrado figura 5.17.

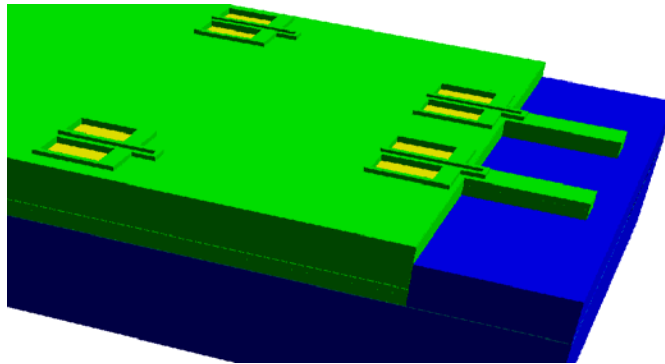


Figura 5.17 Áreas de contacto de los piezorresistores para su conexión en puente de Wheatstone.

• Deposito de metal

Una vez definidas las áreas de contacto se deposita una capa de metal de $0.5 \mu m$ para el alambrado del puente de Wheatstone

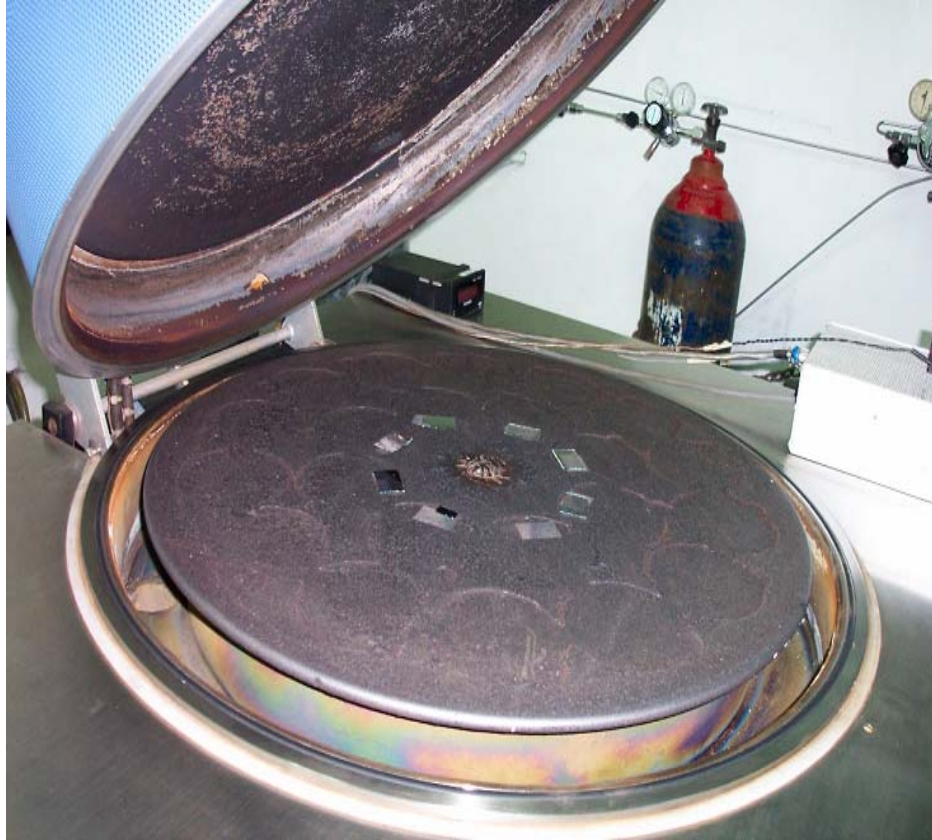


Figura 5. 18. Deposición del aluminio en un evaporador térmico.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m6

La capa de aluminio es atacada empleando la mascara de alambrado m6, figura 5.19, para obtener el trazado del alambrado, figura 5.20.

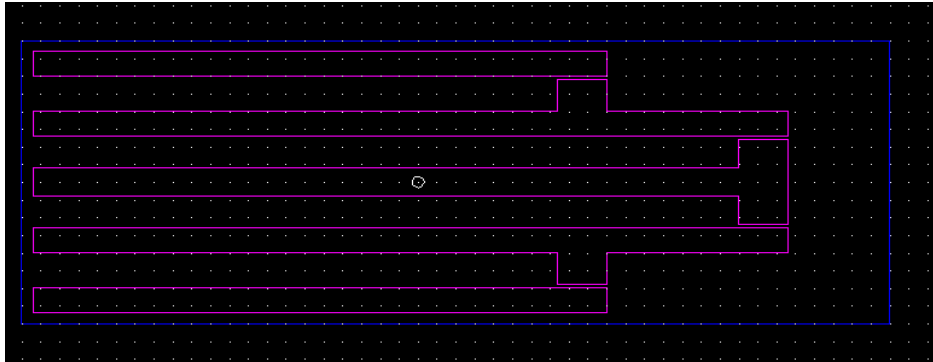


Figura 5.19. Mascara m6 para definir el alambrado metálico.

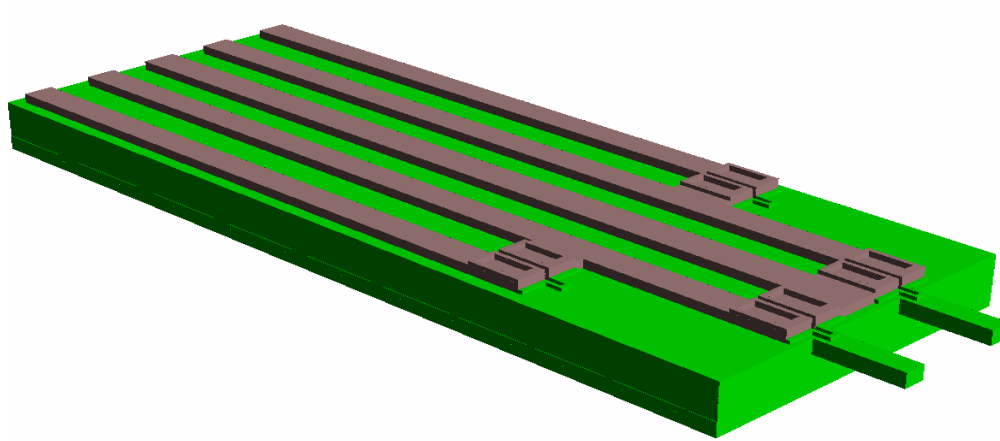


Figura 5.20 Vista del trazado del alambrado metálico.

- Deposición de la segunda capa metálica.

Se hace una deposición de aluminio de $0.05\mu m$ para formar los cantilevers bimorfos.

- Deposito de foto-resina y trazado con la mascara m7

Se ataca usando la mascara m7.

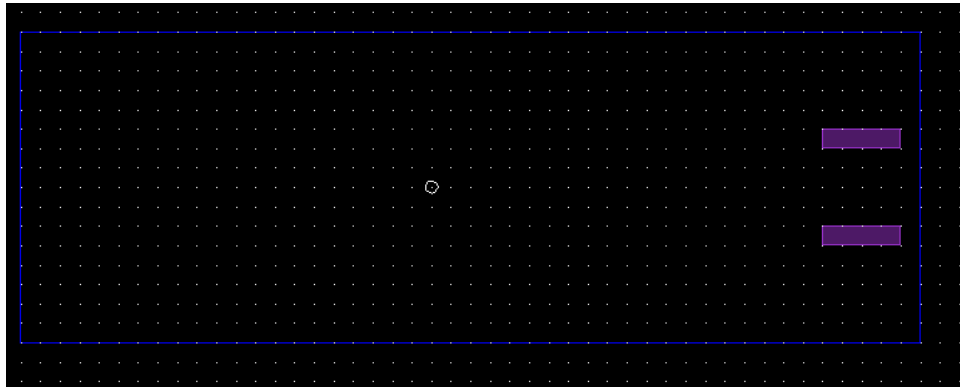


Figura 5.21. Mascara m7 para definir el microcantilever bimorfo.

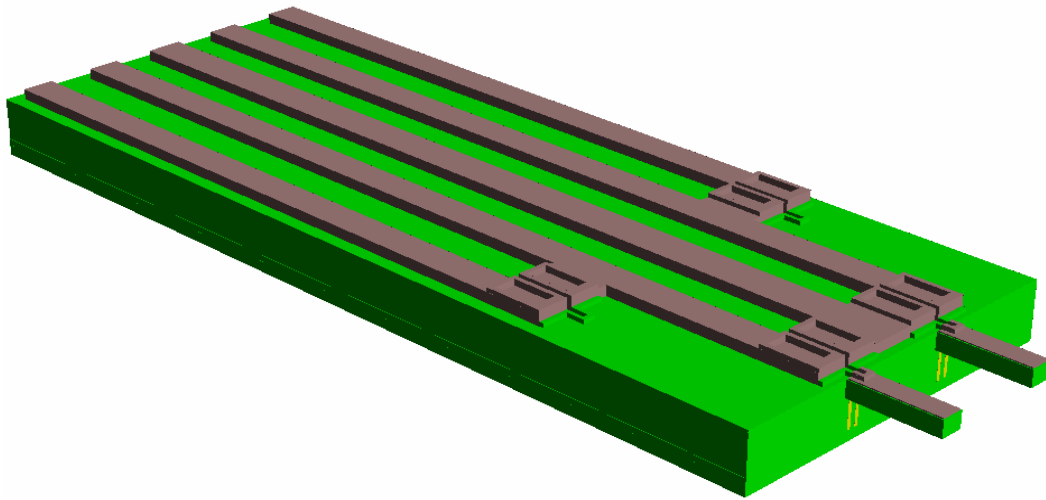


Figura 5.22 Microcantilevers con la segunda capa de metal

La figura 5.22 nos muestra a los microcantilevers recubiertos con la segunda capa de metal, la figura 5.23 el microsensado terminado y la figura 5.24 muestra como quedaría toda la oblea lo cual muestra las bondades de la fabricación de múltiples sensores en una sola operación del proceso de fabricación.

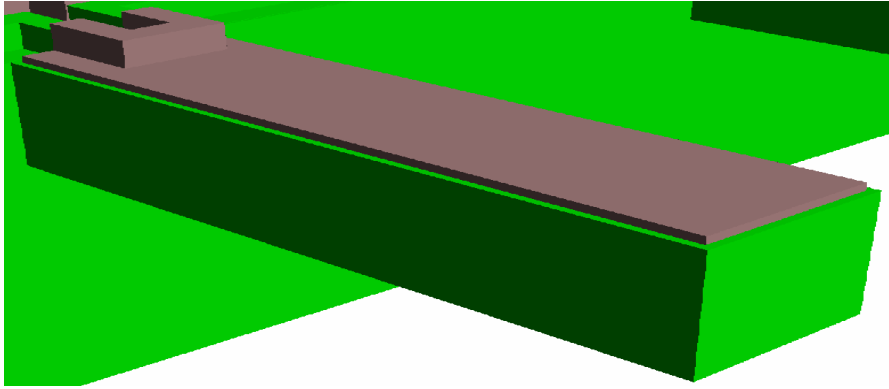


Figura 5.23 Sensor infrarrojo después del fin del proceso.

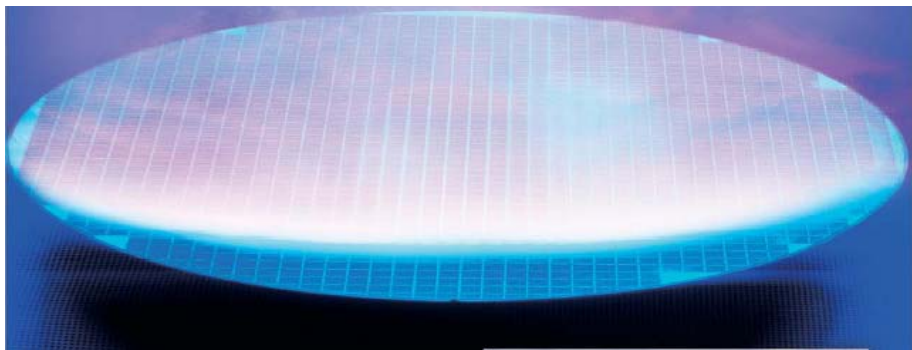
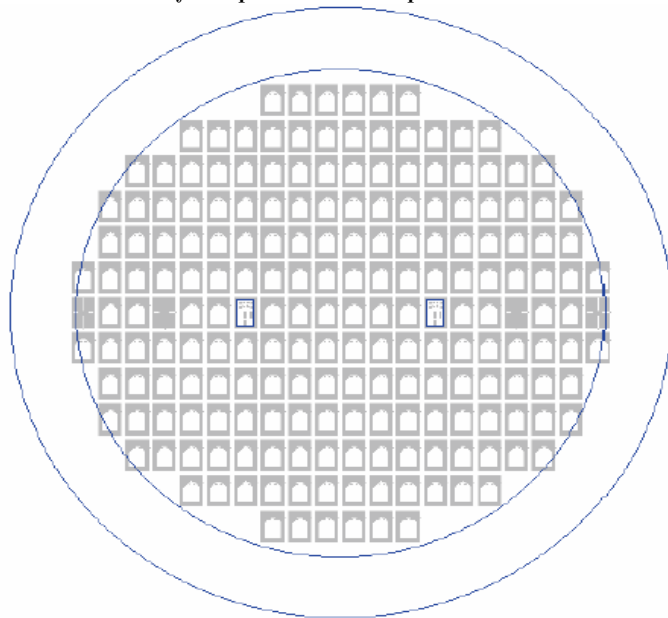


Figura 5.24 Vista de la oblea incluyendo todos los dados

Capítulo 6. Diseño y simulación

6.1 Dimensiones y desempeño esperado.

Generalmente cuando se trata de diseñar un sensor se especifican las características de este y aplicando los modelos analíticos determinados para dicho sensor, se hallaran las dimensiones de este. Desafortunadamente, en el mundo de las micromáquinas esto no es una tarea sencilla debido a que actualmente se carecen de normas y reglas de diseño para la construcción de estos. Otro problema es que en el mundo de las micromáquinas se emplean una gran variedad de materiales y no todos los MEMS se construyen como se muestra en la figura 3.1. Así, cuando se diseña una micromáquina hay que pensar de antemano en dos cosas: primero como se empaquetaran este tipo de dispositivos, ya que generalmente difieren de los circuitos integrados (estos se encuentran cerrados herméticamente) en que deben interactuar directamente con el medio ambiente, el cual puede ser una variable física, una sustancia química, un fluido, una radiación como lo es el caso de ese trabajo etc. Lo otro es de que quien lo fabricara, ya que no existen reglas estándar, como se menciono anteriormente, entonces habrá que apearse al proceso y reglas del fabricante el cual nos construirá nuestra micromaquina llevando esto a hacer modificaciones al diseño original; así, habrá que diseñar de antemano con ciertas restricciones si es que se pretende construir la micromáquina.

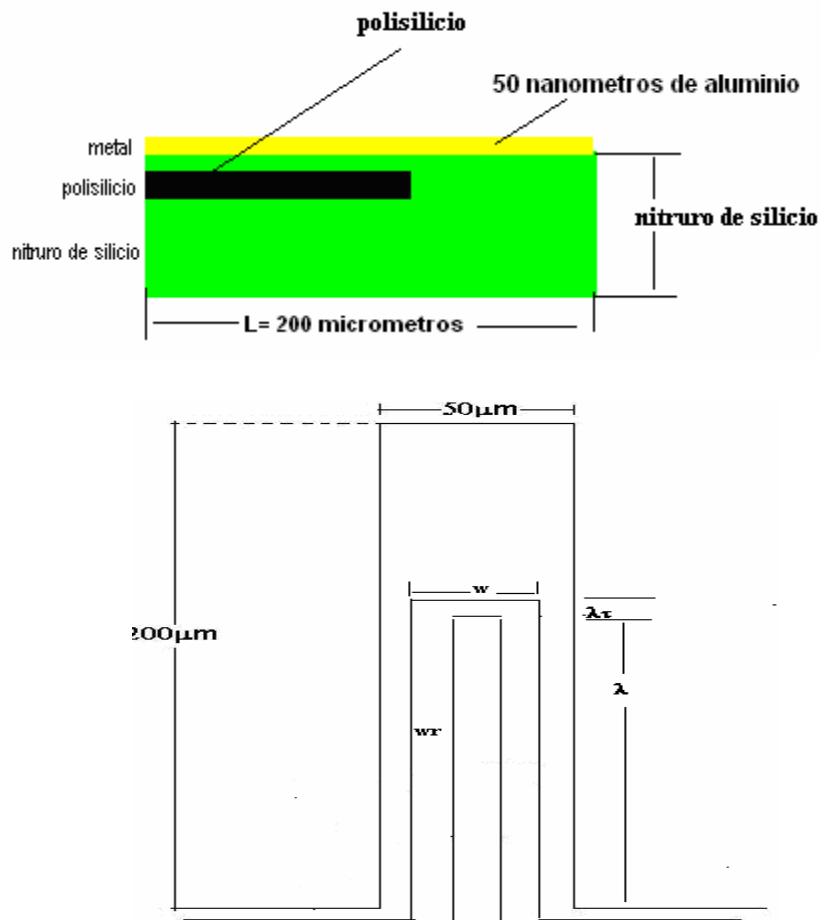
Se dan ciertas dimensiones, estas están basadas en el proceso actual del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica figura 6.1, de este proceso se deduce que dimensiones menores a las propuestas en este diseño son difíciles de realizar.



Figura 6.1 Instalaciones del INAOE.

6.2. Dimensiones.

Como se menciona basado en el proceso que se pretende utilizar para la construcción del microcantilever se dan algunas dimensiones para el microcantilever y el piezorresistor ver figura 6.2. Basándose en estas dimensiones y las expresiones desarrolladas para la deflexión, frecuencia de resonancia, constante de resorte y otras se determinaran las características del microsensar.



$$t_{nisu} = 50nm, \quad t_{nif} = 200nm, \quad t_{poly} = ?, \quad \lambda = 110\mu m, \quad \lambda_r = 40\mu m$$

Figura 6.2 Dimensiones del microcantilever.

El diseño óptimo del microcantilever considerando las dimensiones del cantilever y el piezorresistor, se logra encontrando el mínimo esfuerzo de superficie detectable ecuación 4.35 ($\sigma_{s_min} = V_{ruido} / \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \sigma_s^{-1} \right) V_{in}$) este esfuerzo de superficie se encuentra haciendo $V_{out} = V_{ruido}$ en la ecuación 4.10 ($V_{out} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} V_{in}$) y $\frac{\Delta R}{R} \sigma_s^{-1} = K \varepsilon \sigma_s^{-1}$ en la ecuación 4.35 lo que da

$$\sigma_{s_min} = V_{ruido} / \frac{1}{4} (K \varepsilon \sigma_s^{-1}) V_{in} \quad (6.1)$$

el esfuerzo de superficie σ_s es dado en unidades N/m y puede ser minimizado seleccionando un piezorresistor con bajo ruido y un alto factor de galga, así como las dimensiones del piezorresistor y del cantilever, para mejorar la sensibilidad se requiere que el esfuerzo del piezorresistor este en función del esfuerzo de superficie aplicado a la viga, de las ecuaciones 4.21, 4.29 y 4.31 se observa que el plano neutral en $z=0$ definido en la ecuación 4.24 no esta libre de esfuerzos cuando existe un esfuerzo de superficie o cualquier esfuerzo aplicado, lo que sucede es que la posición del plano neutral efectivo se ha desplazado mas haya del esfuerzo de superficie como se observa en la figura 4.5. Así de este modelo, es posible encontrar el espesor óptimo del microcantilever usando la ecuación 6.1 y substituyendo en esta la ecuación 4.20 expresada esta como

$$V_{ruido} = \sqrt{4k_B TR \Delta f + \frac{\alpha V_{in}^2}{N} \ln \left(\frac{f_{max}}{f_{min}} \right) + \left(\frac{K h_{NR}}{EI} \right)^2 \frac{k_B T L^3 k V_{in}^2}{48 \lambda} \frac{\Delta f}{f_{res}}} \quad (6.2)$$

El espesor del piezorresistor optimizado para un microcantilever de longitud $L = 200 \mu m$, longitud del resistor $\lambda = 110 \mu m$, $w_r = 20 \mu m$, se muestra en la tabla 6.1, en la tabla 6.2 se muestran los parámetros usados para la optimización y en la tabla 6.3 se muestra el desempeño del sensor de esfuerzos del microcantilever. En la figura 6.3 se muestra la grafica de optimización del espesor del piezorresistor

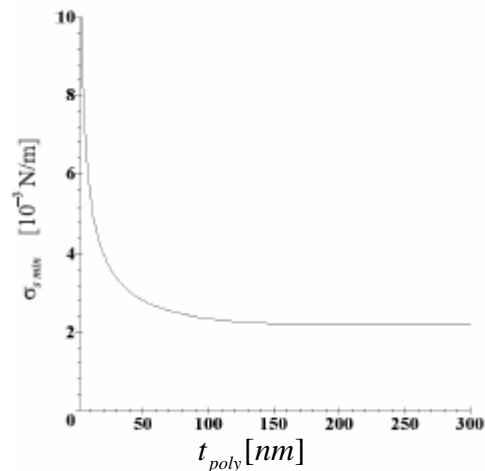


Figura 6.3 $\sigma_{s, min}$ como una función del espesor del piezorresistor de poli silicio

Un punto importante en el calculo fue el ruido ecuación 6.2 de, sobre todo el ruido $1/f$, de las expresiones dadas para este, en el capítulo 4 se puede observar que depende fuertemente del numero de portadores y del recocido del piezorresistor (para las graficas anteriores como ya se menciona se tomaron de los estudios de Obermeir [11]). **Por tanto, lo que se hace generalmente es construir un prototipo y de este medir el valor de α para poder determinar el ruido $1/f$.**

Tabla 6.1 Espesor del cantilever y del piezorresistor

$t_{ni\ sup} = 50nm$	$t_{ni\ inf} = 200nm$	$t_{poli} = 150nm$
----------------------	-----------------------	--------------------

Tabla 6.2 Parametros usados para la optimizacion

K	α	Δf	V_{in}	ρ
30	1.4×10^{-3}	1–51Hz	5V	$6 \times 10^{-3} \Omega \cdot cm$

Tabla 6.3 Características calculadas del sensor de esfuerzos del microcantilever

$k[N/m]$	$f[kHz]$	$\sigma_{smin}[N/m]$	$\frac{\Delta R}{R} \sigma_s^{-1} [(N/m)^{-1}]$
0.04	17	1.1×10^{-3}	4.8×10^{-1}

Para el cálculo del desempeño del microcantilever se usan los parámetros mostrados a continuación, los cuales son los que se usan para caracterizar el detector de braza. Los datos acerca de las brazas para obtener el desplazamiento del microcantilever fueron obtenidos del National Fire Alarm Code Handbook [10].

Para la ecuación 3.53 los datos para hallar la potencia absorbida son:

$$L = 0.50m$$

$$\sigma_{S-B} = 5.67 \times 10^{-12} W \square cm^{-2} \square K^{-4}$$

$\eta = 0.2$ para longitudes de onda menores a $2.5 \mu m$ y $\eta = 0.1$ para longitudes mayores

$\varepsilon = 0.85$ para brazas y 0.4 para el fondo

$$A_D = 0.01 \mu m^2$$

$$A_s = 0.0025 m^2$$

$$T_s = 1073K \text{ y}$$

$$T_R = 294K$$

Utilizando la ecuación 3.63 son los datos para hallar el desplazamiento z

$$t_1 = 50nm$$

$$t_2 = 0.8 \mu m$$

$$\lambda_1 = 237W / mK$$

$$\lambda_2 = 5.5W / mK$$

$$\alpha_1 = 23.1 \times 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_2 = 1.6 \times 10^{-6} K^{-1}$$

$$E_1 = 77GN / m^2$$

$$E_2 = 222GN / m^2$$

$$l = 200 \mu m$$

$$\Delta T = 25K$$

6.3 Modelo de elemento finito

Para corroborar la validez del modelo analítico se hace un modelo de elemento finito (modelo computacional) que permite encontrar la respuesta del microcantilever (deflexión) debido a los esfuerzos internos generados por cargas térmicas. Los esfuerzos internos inducidos por la intensidad de radiación incidente sobre el microcantilever fueron simulados con una variación de temperatura. La deflexión máxima es directamente proporcional a la intensidad de radiación (ecuaciones. 3.55 y 3.63).

Así una temperatura diferencial aplicada al modelo de elemento finito partiendo de la ecuación 3.53. Haciendo un análisis termomecánico en el cual el software hace un calculo del desplazamiento mecánico en función de la temperatura dando los resultados siguientes

6.3.1 Simulación del cantilever utilizando el método de elemento finito (FE).

La simulación que se hace aquí será para analizar el desplazamiento del microcantilever en función de la temperatura generada esta por la incidencia de la radiación infrarroja sobre la película de aluminio que cubre al

microcantilever, el software utilizado para este análisis es COVENTOR [25].

6.3.2 Implementación del modelo de elemento finito del microcantilever.

El modelo de elemento finito contiene información del microcantilever y esta es:

Geometría----- dividida en elementos finitos

Materiales-----Propiedades

Excitaciones-----Cargas

Limitaciones-----Condiciones de frontera

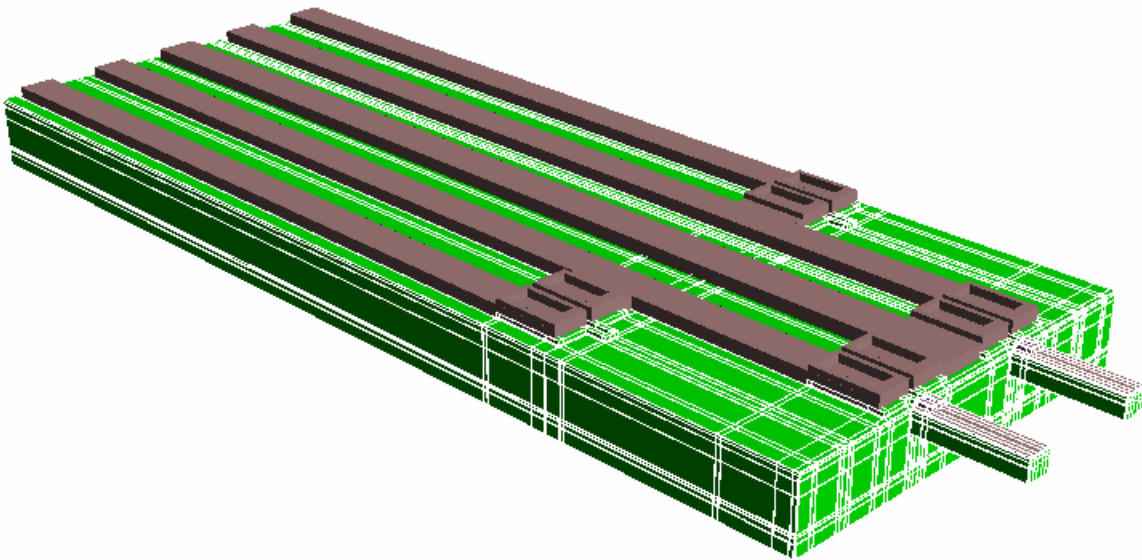


Figura 6.4 Modelado con elemento finito del sistema

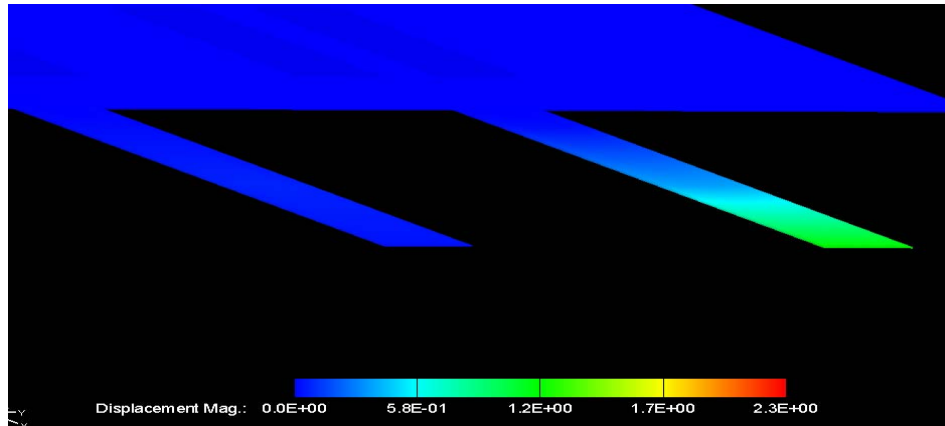


Figura 6.5 Simulación del desplazamiento del microcantilever

La figura 6.4 muestra el modelado con elemento finito de todo el sistema y la figura 6.5 muestra la simulación del sistema completo, como puede apreciarse el único elemento que se deflexiona es el sensor propiamente dicho, el microcantilever mudo permanece sin deflexión así que para hacer la simulación completa se hará únicamente con el microcantilever que recibe la radiación infrarroja.

La figura 6.6 muestra el modelado con elemento finito del cantilever.

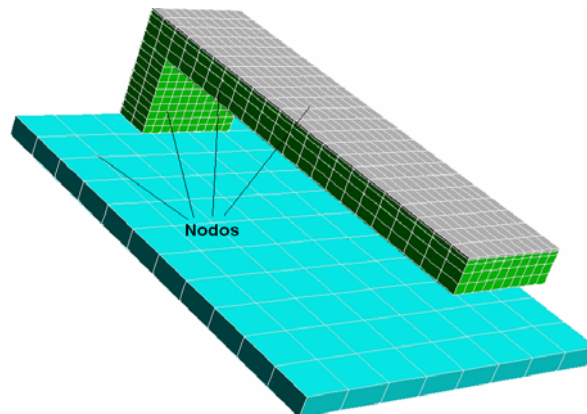


Figura 6.6 Modelo de elemento finito del microcantilever a analizar.

Esto es, el concepto de análisis estructural de elemento finito involucra obtener una solución aproximada para los valores de desplazamiento de un continuo dividiendo dicho continuo dentro de un número de elementos finitos y resolviendo la función que representa el desplazamiento de los nodos. Estos elementos son conectados con un número específico de nodos en sus fronteras. Las funciones son seleccionadas para representar el desplazamiento dentro del elemento finito basadas en los desplazamientos nodales. Las funciones de desplazamiento pueden ser usadas para determinar el estado de deformación dentro del elemento finito como una función de los desplazamientos nodales. El conocimiento de estas deformaciones combinadas con cualquier deformación existente interna y con la combinación de las propiedades elásticas puede ser usado para determinar el estado de los esfuerzos dentro de los elementos. Los esfuerzos internos existentes deberán ser el resultado de la expansión térmica, esfuerzos fotoinducidos. Un sistema de fuerzas es aplicado en los nodos, el cual es igual a cualquier carga distribuida o esfuerzo aplicado en la frontera tal que el sistema este en equilibrio. El desplazamiento del elemento en términos de las fuerzas internas y de las fuerzas aplicadas esta dado por la siguiente ecuación:

$$\{F\}_a = [k]_a \{\delta\}_a + \{F\}_{a,p} + \{F\}_{a,\varepsilon 0} \quad 6.1$$

Donde $\{F\}_a$ es la matriz que representa los vectores de fuerza en todos los nodos de un elemento 'a', $\{F\}_{a,p}$ es la matriz de fuerza resultante de las fuerzas aplicadas a los nodos o cargas distribuidas y $\{F\}_{a,\varepsilon 0}$ representa fuerzas sobre los nodos resultantes de las deformaciones internas, tales como los esfuerzos térmicos o fotoinducidos. La matriz, $[k]_a$ es la matriz de rigidez del elemento y $\{\delta\}_a$ representa los desplazamientos.

6.3.3 Simulación

La figura 6.7 muestra el mallado del microcantilever en sus diferentes capas, ya que dentro de este cantilever se encuentra embebido el microsensar piezorresistivo

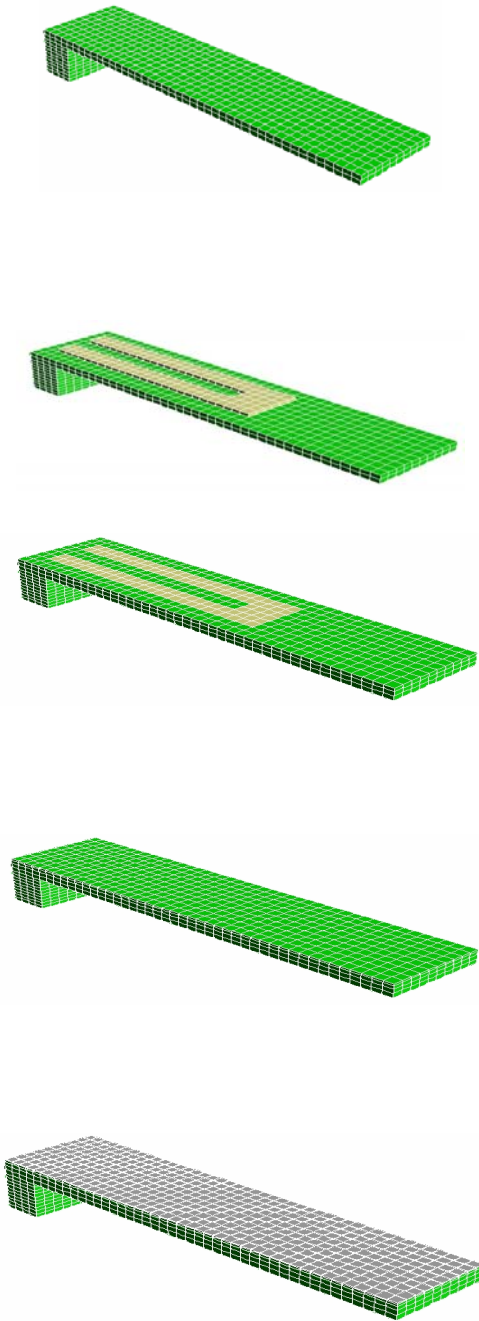
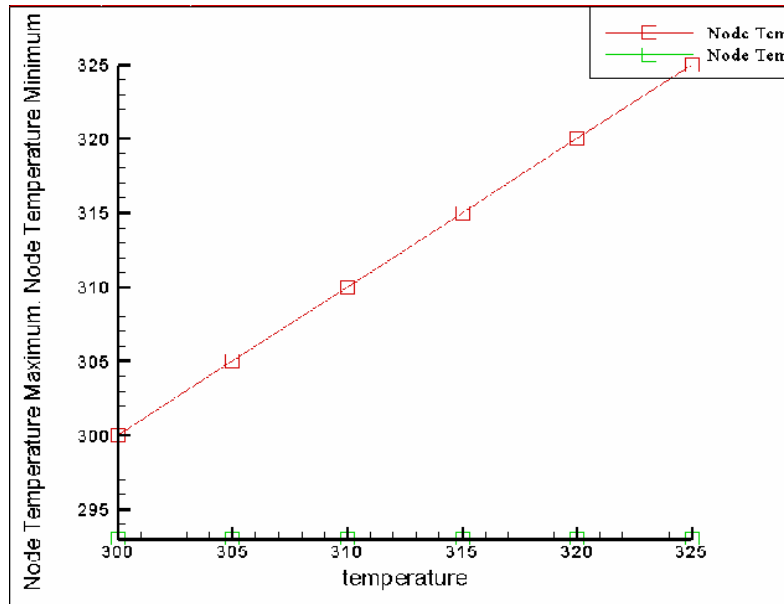


Figura 6.7 Modelo de elemento finito usado en la simulación.

En la simulación se vera el efecto de la variación de la temperatura sobre el microcantilever, lo cual lleva a un fenómeno termomecánico (variación de temperatura – desplazamiento mecánico).

En esta simulación el microcantilever se encuentra a una temperatura de 300 K y la superficie de este se va incrementando de 5K en 5K, hasta que la superficie alcanza una temperatura de 325 K figura 6.8

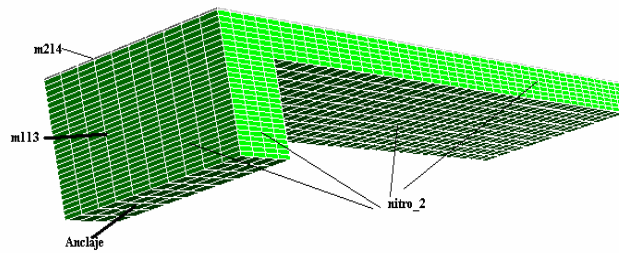


	temperature	Node Temperature Maximum	Node Temperature Minimum
Step 1	300	300	293
Step 2	305	305	293
Step 3	310	310	293
Step 4	315	315	293
Step 5	320	320	293
Step 6	325	325	293

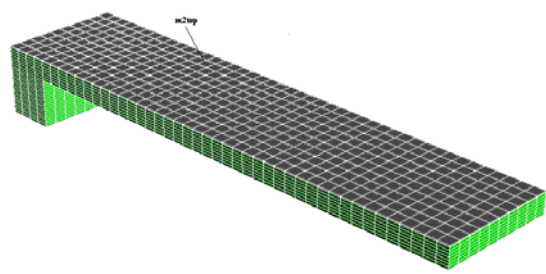
Figura 6.8 Incremento de temperatura en la superficie del microcantilever

Las condiciones frontera mecánicas de superficie son: Anclaje y pared posterior del microcantilever fijas, las condiciones frontera térmica son

cambio de temperatura sobre el aluminio, ver figura 6.9. Las condiciones frontera térmicas de volumen son temperatura del nitruro fija.



a)



b)

SurfaceBCs	FixType	Patch1	and1	Patch2	and2	Patch3	LoadValue	Variable	Transient	
Set1	fixAll	anclaje	or	m214	or	m114	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set2	Temperature	m2top	and	none	and	none	Scalar	320	Mech...	Fixed
Set3	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set4	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set5	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set6	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set7	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set8	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set9	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set10	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set11	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed
Set12	none	none	and	none	and	none	Scalar	0.0	Fixed	Fixed

c)

VolumeBCs	BCType	Part	LoadValue	Variable	Transient
Set1	T-Fixed	nitro_2	Scalar	293	Fixed
Set2	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set3	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set4	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set5	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set6	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set7	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set8	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set9	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set10	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set11	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set12	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set13	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set14	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set15	none	none	Scalar	0.0	Fixed
Set16	none	none	Scalar	0.0	Fixed

d)

Figura 6.9 En a), b) y c) anclaje, m113, m214 condiciones frontera de superficie inmóviles, m2top condición de cambio de temperatura en a) y d) condiciones frontera de volumen siempre una misma temperatura.

Con las condiciones frontera, la temperatura de 300 K en la parte baja del microcantilever y el incremento de temperatura, de hasta 325 K en la superficie del microcantilever y con la diferencia de materiales, la deflexión de este se observa en la figura 6.10.

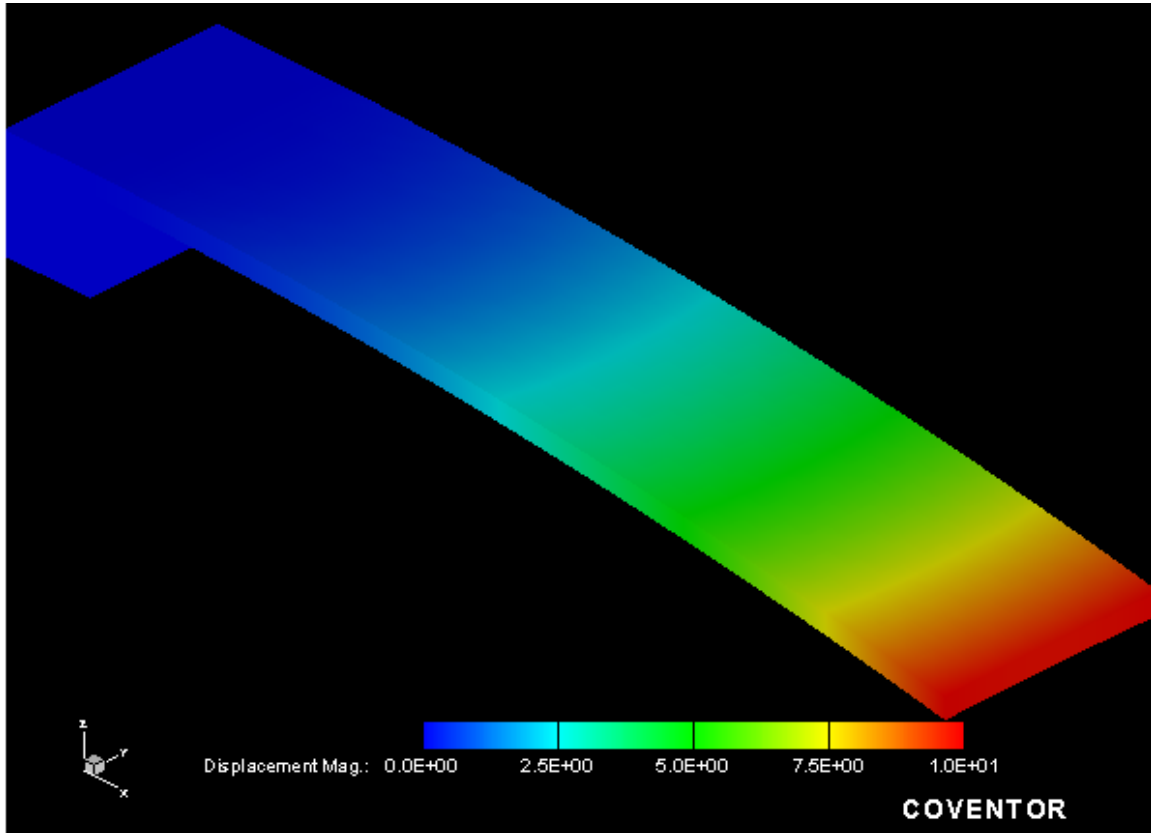
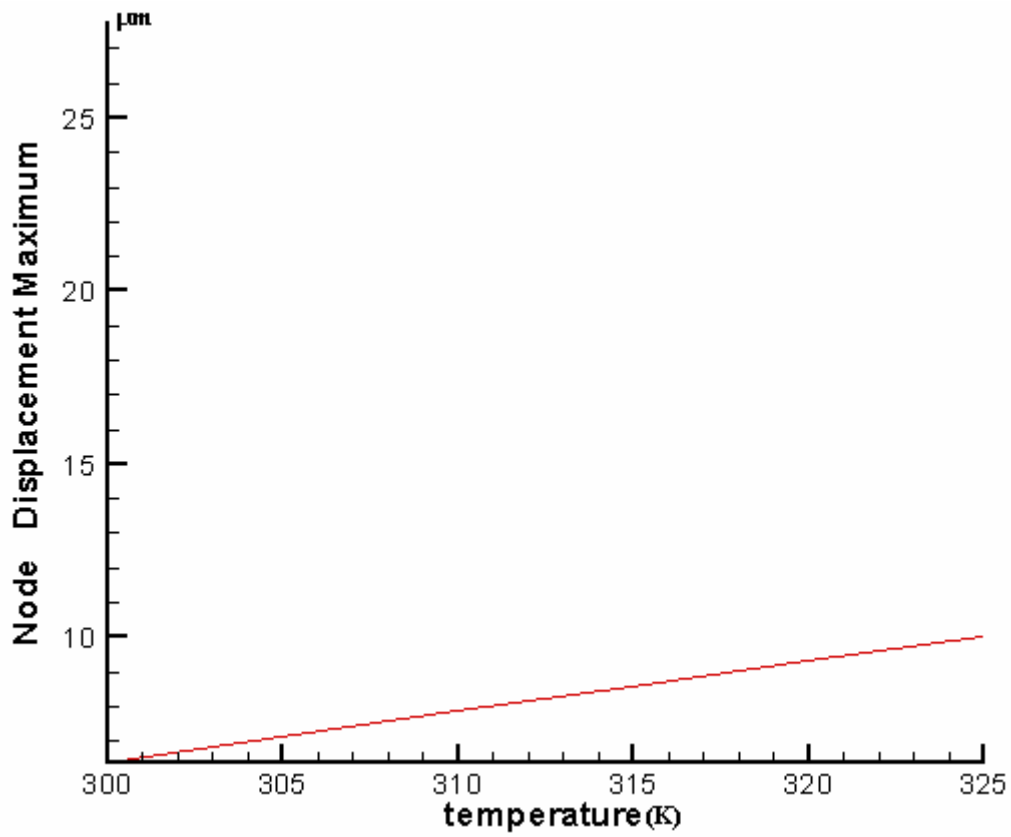


Figura 6.10 Deflexión del microcantilever (μm) con la variación de temperatura (K)

Esta deflexión se muestra en forma grafica y de tabla en la figura 6.11, el desplazamiento esta dado en micrómetros.



	temperature	Node	Displacement Maximum
Step 1	300		6.377093E00
Step 2	305		7.128194E00
Step 3	310		7.869957E00
Step 4	315		8.602495E00
Step 5	320		9.326127E00
Step 6	325		1.004157E01

Figura 6.11 Deflexión del microcantilever con la variación de temperatura.

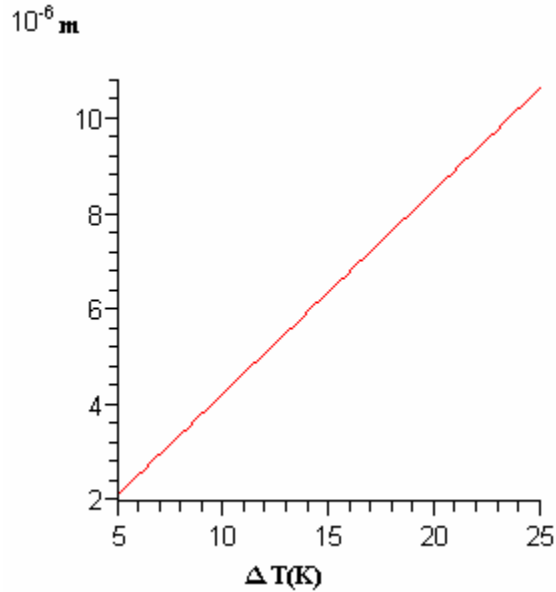


Figura 6.12 Resultados empleando el modelo analítico

En la figura 6.12 se muestran los resultados derivados del empleo del modelo analítico ecuación 3.63 graficada con Maple, se nota que para la máxima diferencia de temperatura, en el modelo analítico existe un desplazamiento $z = 10.65 \mu\text{m}$ y para el modelo de elemento finito de la grafica o de la tabla de la figura 6.11 el desplazamiento es $z = 10.041 \mu\text{m}$ lo que da una diferencia del 6% lo en cierta forma nos valida nuestro modelo analítico. Sin embargo para poder dar validez a estos, es necesario construir el cantilever y hacer las mediciones correspondientes ver figura 6.14.

La figura 6.13 muestra los esfuerzos de Von Mises sobre el microcantilever, estos se concentran en la parte del anclaje del microcantilever y sobre la superficie del microcantilever lo que hace que este se deflexione, además no sobrepasan el límite inferior de cedencia lo cual garantiza que el microcantilever no sufrirá fractura.

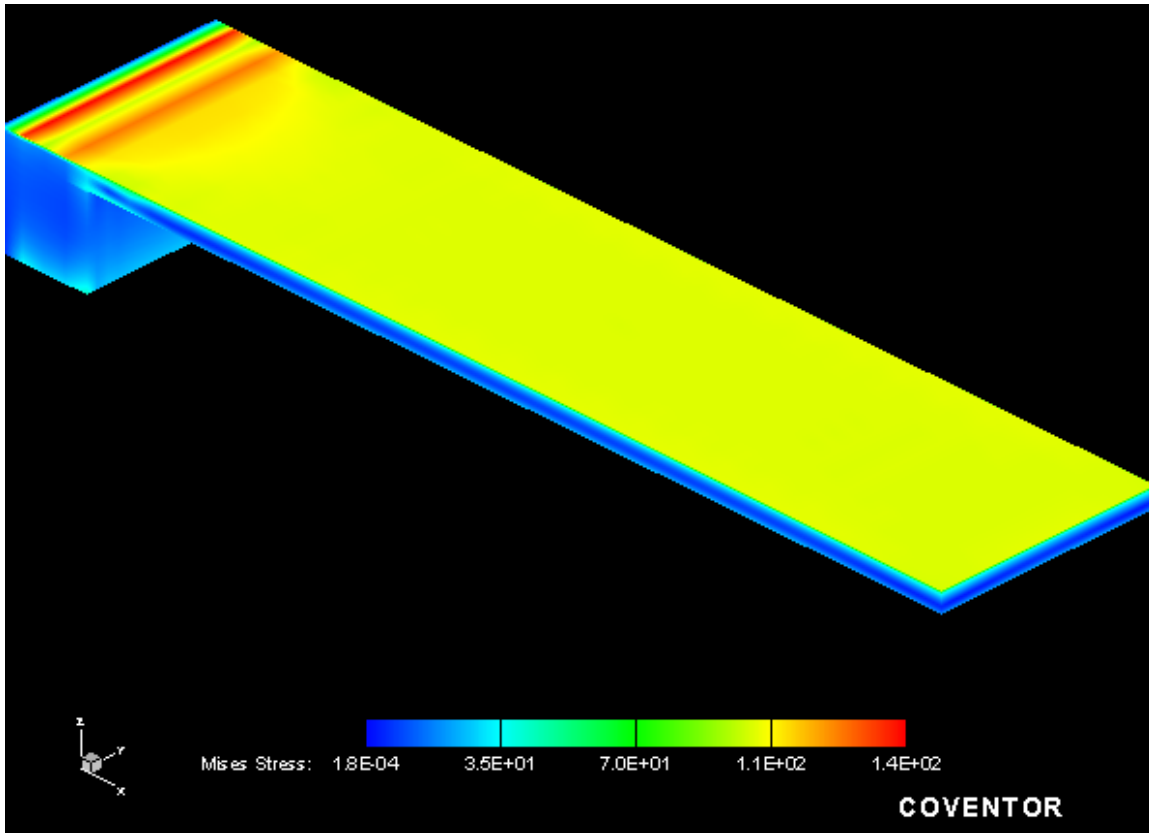


Figura 6.13 Esfuerzos de Von Mises sobre le microcantilever

El análisis anteriores merece los siguientes comentarios: Los resultados del método de elemento finito son aproximados, si se quisiera un resultado exacto el numero de elementos en los que se debería dividir el microcantilever deberían ser un numero infinito, si no se toma un numero infinito de elementos, pero si un mayor numero de elementos que el presentado en este análisis y el resultado tiende a converger esto da idea de que el resultado puede ser correcto.

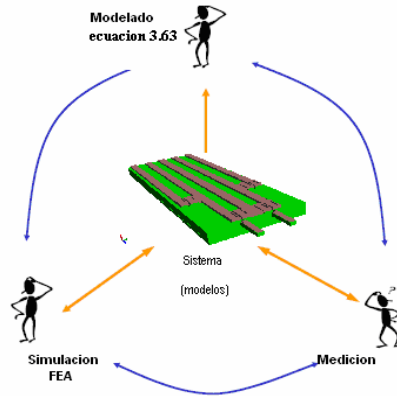


Figura 6.14 Deberá construirse el sensor para validar los modelos

6.4 Propuesta para una mejor sensibilidad.

Si se desea mejorar el desempeño del microcantilever es necesario mejorar η que es la fracción de la potencia absorbida ya que la deflexión del cantilever es directamente proporcional a la potencia absorbida. La η se puede aumentar mejorando las características de la capa absorbente. Como se ha mencionado, para alcanzar una gran sensibilidad, la capa que cubre al cantilever (en este caso aluminio) debe tener una gran absorbancia. Por otro lado para no aumentar la constante de tiempo del sensor, la masa de la capa tiene que ser pequeña. La deposición de la capa absorbente es un punto crítico en la tecnología de los detectores infrarrojos. Existen diferentes métodos de deposición de capas absorbentes para detectores térmicos infrarrojos los que nos dan diferentes características de absorción [12] [13]. Estos métodos son:

- 1.- Deposición de películas metálicas delgadas.
- 2.- Deposición por el proceso de galvanizado de metales negros altamente porosos.
- 3.- Evaporación de un metal en una atmósfera de nitrógeno a baja presión.

De estos, el mecanismo más efectivo para la absorción de la radiación es la alta porosidad. Partículas con tamaño menor que la longitud de onda generalmente absorben y difractan la luz. Su absorción se extiende sobre el rango espectral pero decrece cuando aumenta la longitud de onda. Por ejemplo una película de oro negro con un espesor correspondiente a $500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ absorbe más del 99% de la radiación incidente. Esta película muestra un coeficiente de absorción de $A=1.00$. Películas mas delgadas serian necesarias para alcanzar este coeficiente con otro tipo de absorbente, como por ejemplo lo seria el aluminio. Desafortunadamente la alta porosidad de las películas los hace difíciles de manejar. Son vulnerables y fáciles de destruir al tacto. Usualmente son depositadas como el último paso del proceso tecnológico. La deposición de películas porosas también tiene otras aplicaciones porque pueden ser usadas para producir grandes áreas de absorción para mejora la sensibilidad de sensores de humedad o de gas.

6.4.1 Películas metálicas delgadas

En las películas delgadas la movilidad de los electrones es alta; por tanto la fuerza del campo eléctrico paralelo a la superficie se desvanece. Esta condición frontera causa la reflejancia metálica de la luz. Por otro lado si una película es muy delgada, entonces es transparente a la luz puesto que no hay suficientes electrones para interactuar con esta. Entre estos dos casos existe un espesor crítico, para el cual, los electrones interactúan con la onda pero no son libres de movimiento. De esta forma el movimiento de los electrones toma energía de la onda y ocurre la absorción. El efecto puede ser descrito por la electrodinámica clásica. La teoría predice que hay únicamente transmisión para películas muy delgadas y únicamente reflectancia para películas gruesas. La absorción ocurre cuando la resistencia de hoja es cercana al valor crítico R_k . La máxima absorción es 0.5. Si se desprecia la influencia del substrato, el valor crítico de absorción es $188\Omega/\square$.

6.4.2 Metales negros porosos

Si un metal es depositado por electroplatinado y si una pequeña cantidad de un metal pesado es añadida a la solución electrolítica, entonces la película depositada no tendrá una superficie lisa, sino que será muy porosa. Esta clase de película es llamada metal negro. Por ejemplo, si se deposita platino por electrodeposición y se agrega una pequeña cantidad de un material pesado como el plomo, a esta película se le llamara platino negro. El proceso de crecimiento esta determinado por dos características. El movimiento de los iones en la solución galvánica sigue la trayectoria de la corriente eléctrica. Su principal dirección es perpendicular a la superficie. Entonces la estructura existente es un atractor para las demás partículas. Esta característica causa un crecimiento dendrítico el cual es caracterizado por “árboles” como se muestra en la figura 6.15. Estos crecen normales a la superficie. La figura 6.16 muestra su espectro de absorción al infrarrojo. La figura 6.17 muestra la absorción medida para una longitud de onda de $10 \mu m$ contra masa por área. Para obtener una absorción mayor a 0.95 se requiere de una película de más $1.5 g/cm^2$

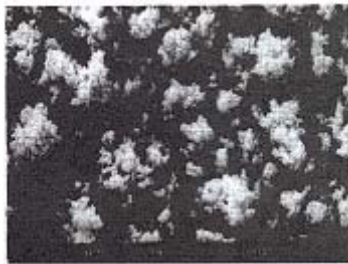


Figura 6.15 Fotografía del platino negro.

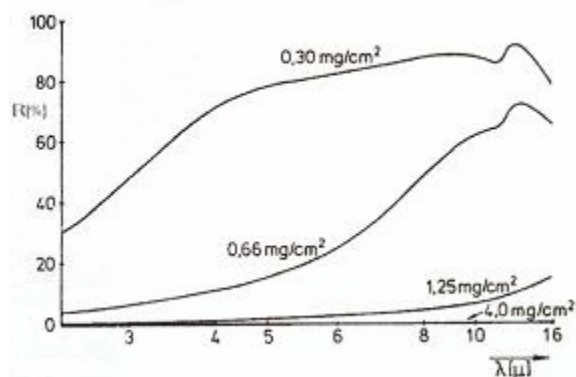


Figura 6.16 Reflejanza al infrarrojo del platino negro

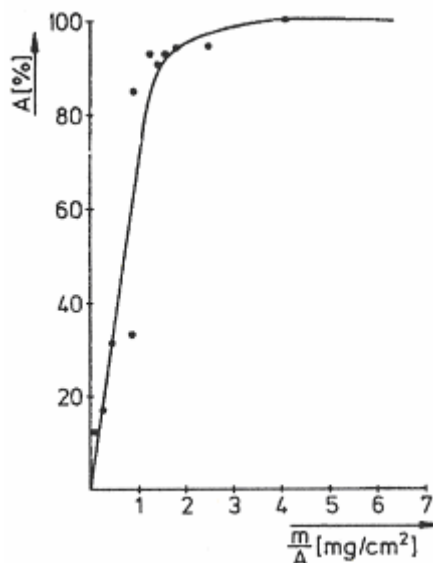


Figura 6.17 Absorción del platino negro contra masa por área.

Como se concluye de lo anteriormente descrito, la eficiencia fototérmica depende fuertemente de las propiedades ópticas del absorbedor, por lo cual resulta fundamental para lograr altas sensibilidades la utilización de superficies selectivas.

Existen diferentes materiales que poseen propiedades selectivas, como son el cromo negro, níquel negro, cobre negro, oro negro etc.

En este trabajo el material propuesto es el aluminio debido a su bajo peso su alta conductividad térmica, sus características de absorbedor fototérmico así como su bajo costo.

Para lograr una mayor sensibilidad es conveniente utilizar aluminio negro. Este se puede lograr generando primero una capa porosa de alumina a través de un anodizado electrolítico y luego electrodepositando pigmentos negros a partir de una solución elaborada con una sal de un metal. Los pigmentos mas usados se obtienen a partir de Cu, Sn o Ni. El pigmento penetra en los poros del anodizado y queda sellado en su interior ver figura 6.18, confiriéndole a la película una gran resistencia térmica y química. En diferentes publicaciones se muestra que se pueden obtener, mediante este método, superficies selectivas de alta absorbancia de entre 0.90 y 0.95 y bajas emitancias térmicas.

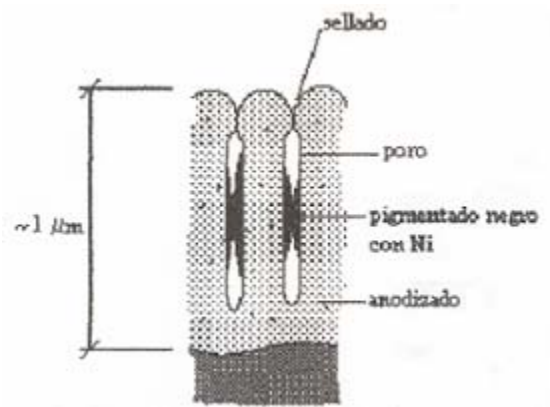


Figura 6.18 Esquema de la ubicación del pigmento en los poros del anodizado

La figura 6.19 muestra el comportamiento espectral del aluminio usando como pigmento Ni y diferentes tiempos de anodizado.

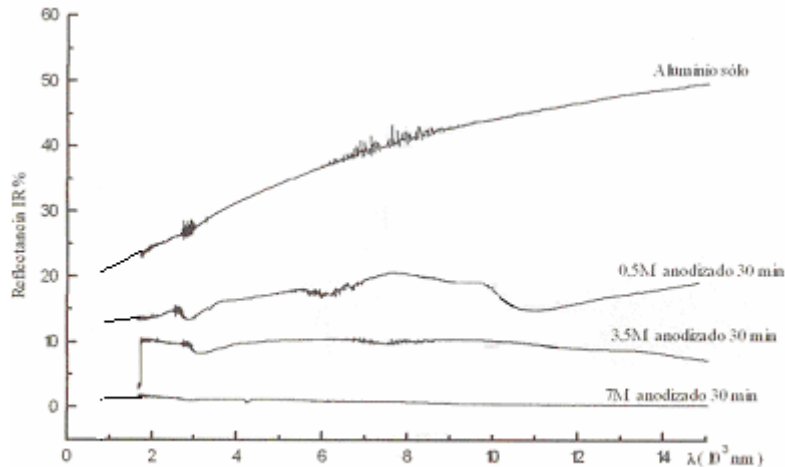


Figura 6.19 Comportamiento espectral comparativo de anodizados hechos con soluciones de distinta molaridad.

6.4.3 Metales porosos depositados por evaporación.

El procedimiento más común para obtener capas porosas es la evaporación de un metal en una atmósfera de nitrógeno. Por ejemplo, si se deposita oro es conocido como oro negro. Las cubiertas son formadas en un reactor de evaporación térmica. El gas es inyectado vía una microválvula. El metal es evaporado desde un alambre de tungsteno calentado eléctricamente.

En la deposición de oro, por ejemplo, este es evaporado térmicamente en una atmósfera de nitrógeno de 100 Pa. Debido a la colisión de los átomos evaporados de oro con las moléculas de nitrógeno, los átomos de oro pierden su energía cinética y bajan lentamente. Cuando estos golpean la superficie, su energía es tan baja que no tienen movilidad en la superficie y los átomos se adhieren en el primer lugar que tocan de la superficie. En contraste con la deposición galvanica, en este proceso la estructura existente no es el atractor para las partículas durante la difusión. El proceso de crecimiento no es dendrítico y no se forman “árboles”. La figura 6.23 muestra la fotografía de una capa. La estructura es un conglomerado de agujas muy finas con dimensiones lineales de alrededor de 25 nm.

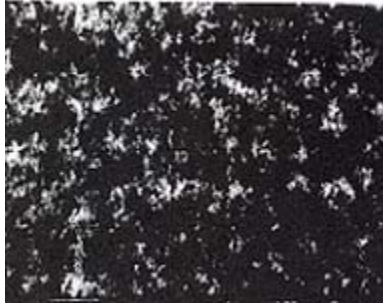


Figura 6.20 Fotografía de oro negro.

De la figura 6.20 se calcula que la porosidad es del orden del 93%. La figura 6.21 muestra el espectro infrarrojo del oro negro y la figura 6.22 la absorción de una longitud de onda de $10 \mu m$ contra el espesor de la película.

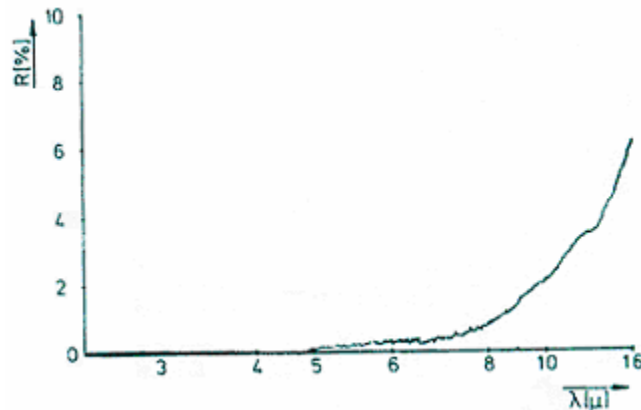


Figura 6.21 Reflejancia infrarroja del oro negro, espesor $250 \mu g / cm^3$.

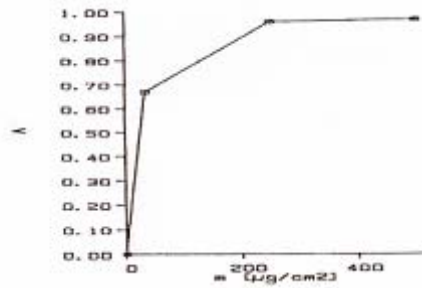


Figura 6.22 Absorbancia del oro negro contra masa por área

Así como se menciona a continuación, las aplicaciones de los microcantilevers es muy variada y en este trabajo se ha desarrollado una aplicación, pero todo el conjunto de ecuaciones, tanto del capítulo 3 como del capítulo 4, pueden ser usadas con sus respectivos ajustes, para otro tipo de aplicaciones como son el desarrollo de sensores físicos, químicos o biológicos.

Capítulo 7. El sensor de brazas

7.1 El microcantilever como sensor de brazas.

Una vez habiendo desarrollado el modelo bimorfo del cantilever podemos aplicarlo a la construcción del sensor de brazas, como se menciona en el capítulo II.

Gp[f

Este sensor de brazas es un sensor infrarrojo de energía térmica el cual convierte la temperatura de la energía radiada por la braza en una señal eléctrica, las características generales de los sensores infrarrojos [8] son las siguientes: Sensitividad, constante de tiempo, relación señal a ruido, rango espectral, y ruido.

Este sensor es para aplicarse a la detección de brazas de carbón bituminoso o subbituminoso, los cuales cuando estos se encuentran en la presencia de una mezcla correcta de oxígeno, humedad, calor y tiempo, son sujetos a una combustión instantánea. Si un carbón ardiente o braza es introducido en una banda de transportación durante una maniobra de carga o descarga, esta puede ser transportada a una trituradora, un silo o un bunker. En tales lugares la braza puede incendiar la acumulación del polvo combustible.

De acuerdo a los materiales propuestos el detector es para que opere en la detección de temperaturas en un rango de 400°C a los 1000°C que son las temperaturas características de las brazas y esto va en un rango de aproximadamente de $2\ \mu\text{m}$ a los $.8\ \mu\text{m}$. De la figura 6.19 y 7.4 se observa que este sensor discrimina longitudes de onda mayores a los $2.5\ \mu\text{m}$ ya que en esas longitudes de onda la absorbancia del aluminio es muy pobre [14] y también se encuentran los rangos de absorbancia de la atmósfera en cuyos rangos no opera ningún sensor infrarrojo ya que la mayoría de la radiación infrarroja es absorbida por esta [10].

Este detector es para que opere en condiciones de oscuridad como ya se menciona en el capítulo II, de tal forma que pueda detectar las chispas o brazas. Como el ojo humano, este sensor necesita tener un contraste entre el objeto y el fondo. Con luz de día o luz artificial este sensor no opera. La

instalación típica requiere de uno o varios sensores de braza montados en un ducto para cubrir la sección transversal del ducto. Este tipo de detectores son montados en la parte superior de bandas transportadoras viendo hacia abajo el carbón que esta siendo transportado. Si se considera que el campo de vista del sensor forma un ángulo de 90 grados a través de la banda transportadora, dependiendo de la altura a la cual se instale y de la sensibilidad del detector se podrán necesitar más de un sensor para cubrir el área requerida (figura 7.1). El campo de vista para un detector es usualmente determinado por el empaquetado de este y se diseña generalmente para limitar el ruido de fondo o para mejorar la relación señal a ruido.

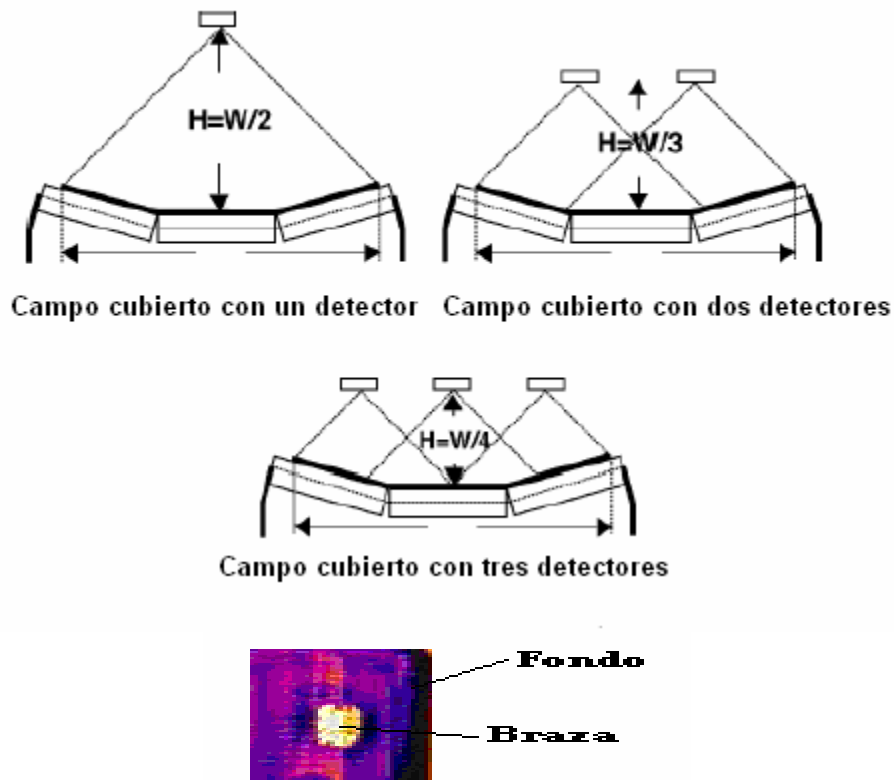


Figura 7.1 Sensores de braza.

Si se considera que la temperatura de fondo es de $60^{\circ}C$ (banda transportadora) y el sensor es para trabajarlo a temperaturas mayores de los $400^{\circ}C$ se tiene de las ecuaciones 3.53 y 3.3.59

Para $673K$ ($400^{\circ}C$) una potencia absorbida de $P_{th} = 9.5\mu w$ y un desplazamiento $Z = 250nm$

Para 333K (60°C) una potencia absorbida de $P_{th} = 0.12\mu\text{W}$ y un desplazamiento de $Z = 3\text{nm}$, estas potencias calculadas para diferentes niveles de absorbancia.

Estos resultados son debido a que los niveles de absorbancia en las diferentes bandas del infrarrojo son diferentes en el aluminio, esto se observa de la figura 7.4 y comprueba que en longitudes de onda mayores a $2.5\mu\text{m}$ su absorbancia es pobre [9] (temperaturas bajas).

En este diseño bimorfo se ha considerado que cuando incide la radiación infrarroja sobre el microcantilever únicamente se calienta el aluminio, este aluminio es muy delgado y deja pasar cierta radiación pero en la banda de $8-14\mu\text{m}$ que es la que nos da la temperatura de fondo y se considera como ruido de fondo, la absorbancia del aluminio es muy pobre y aunque en esta banda es donde el nitruro de silicio es donde presenta mayor absorbancia como puede verse en la figura 7.2 y 7.3 su calentamiento debido a la radiación es casi despreciable, a frecuencias mas altas básicamente no hay absorción.

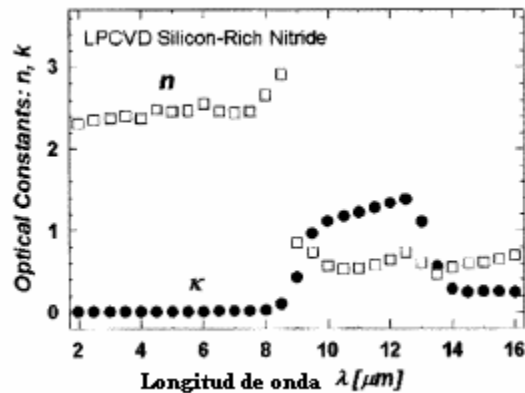


Figura 7.2 Parte real (n) e imaginaria (k) del índice de refracción de una película de nitruro de silicio depositada por LPCVD

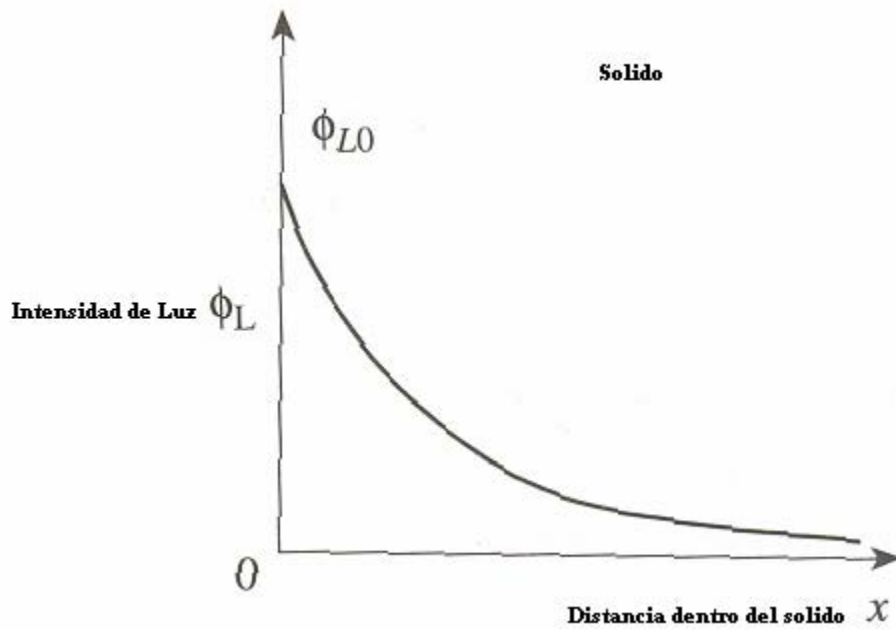


Figura 7.3 Atenuación de luz dentro de un sólido

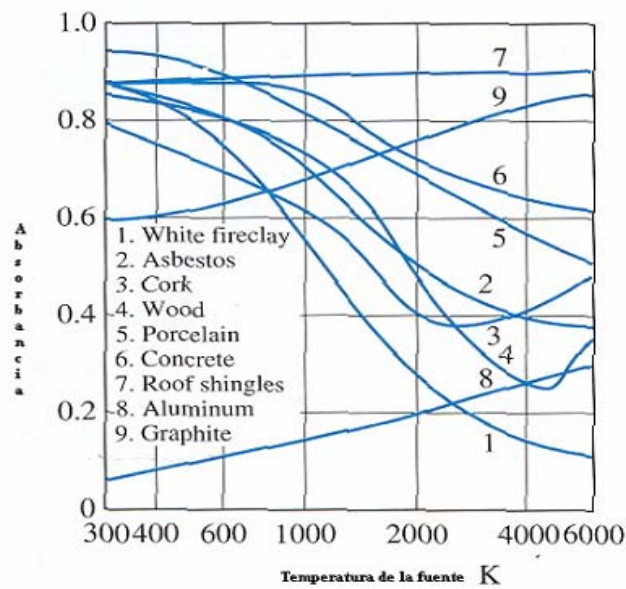


Figura 7.4 Variación de la absorbancia dependiente de la temperatura de la fuente de irradiación, para diferentes materiales a temperatura ambiente.

Considerando la radiación de la braza y del fondo la potencia absorbida total es de $V_o P_{tot} = 19.12 \mu W$

Anteriormente se mostró que el sensor utiliza un piezorresistor conectado en puente de Wheatstone para medir el desplazamiento del microcantilever, se utiliza la ecuación 4.10 y 4.40 para determinar la relación señal a ruido del microsensor, partiendo de los datos que se dan en la sección 6.2

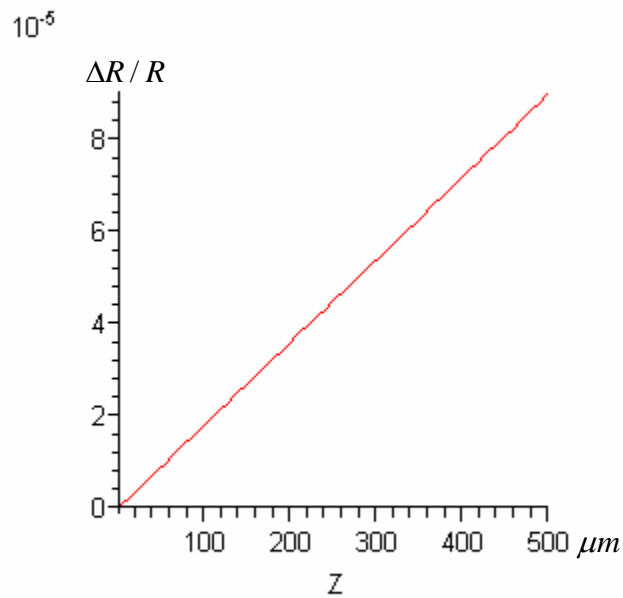


Figura 7.5 Cambio de resistencia en función de la deflexión

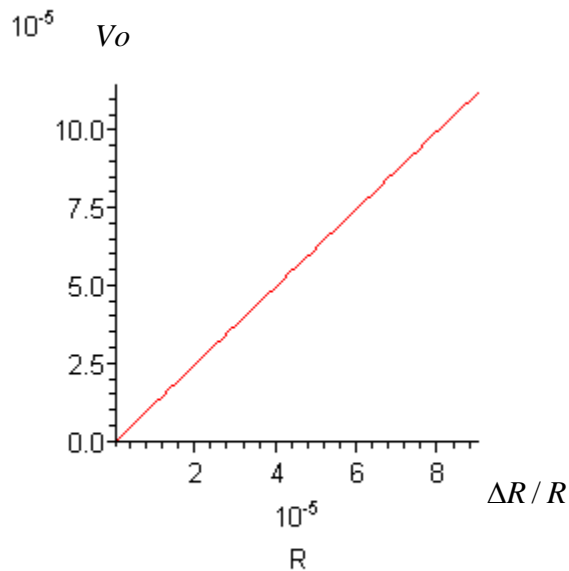


Figura 7.6 Voltaje de salida en función del cambio de resistencia

De las graficas derivadas de las ecuaciones 4.10 y 4.40 ver figura 7.5 y figura 7.6 se obtiene el cambio de resistencia $\Delta R/R = 0.000045$ para un desplazamiento del microcantilever de 250nm y un voltaje de $V_o = 56.5\mu\text{V}$ que es el voltaje de salida cuando se detecta una braza a temperatura de 673K y un voltaje de salida $V_o = 0.675\mu\text{V}$ para la temperatura de fondo de 333K , a esta salida se le suma el ruido calculado con la ecuación 6.2 que es de $V_{\text{ruido}} = 0.58\mu\text{V}$ lo que da un ruido total de $V_{\text{ruido total}} = 1.255\mu\text{V}$ dando esto como resultado una relación señal a ruido igual a

$$S/R = 45$$

De la ecuación 3.67 se determina el tiempo de respuesta del microcantilever

$$\tau \approx 40\text{ms}$$

En este tipo de sensores de brazas no existe un método estándar de prueba para comparar los sensores de los diferentes fabricantes [10]. Cada modelo

tiene sus características propias y estas son las que deberá tomar en cuenta el usuario. Por ejemplo en este microcantilever el usuario entenderá que si a su salida tiene un nivel de voltaje igual o mayor que $V_o = 112.5\mu V$ se estará en presencia de una o mas brazas peligrosas ya que su temperatura es igual o mayor a los $800^\circ C$ si el voltaje de salida es menor que dicho umbral no habrá peligro pero esto se determina en el circuito de calificación ver figura 7.7

7.2 Resumen de las características del sensor.

Como se menciona anteriormente, este tipo de detectores son usados de acuerdo a lo que indica el fabricante y es el único caso en detectores de fuego en que no hay especificaciones para que un sensor de este tipo se pueda comparar directamente con otro sensor de otro fabricante, sino que el usuario debe darle uso de acuerdo a las indicaciones y características que el fabricante indica.

Así este sensor detecta brazas de $5cm \times 5cm$ o mayores también puede detectar menores a este tamaño pero habrá que cambiar el desplazamiento de referencia, esta detección tiene que ser en ductos de aire o en bandas transportadoras con una zona oscura para evitar falsas alarmas.

Este sensor deberá trabajar en conjunción con una regadera para en cuanto se detecte una braza actúe la regadera.

Con luz de día o con luz artificial el sensor no opera.

El detector opera aproximadamente de $2.5\mu m$ a $0.8\mu m$, lo que significa que detecta brazas con temperaturas de $400^\circ C$ a $1000^\circ C$.

Visión de campo de $90^\circ C$

Relación señal/ruido= 45

Desplazamientos del cantilever mayores a $3nm$ ($V_o = 0.675\mu V$) y menores a $250nm$ ($V_o = 56.25\mu V$) deberán considerarse como ruido.

El número de detectores es dependiente del área que se desee cubrir, ver figura 7.1, la figura 7.7 muestra la instrumentación sugerida para el microcantilever.

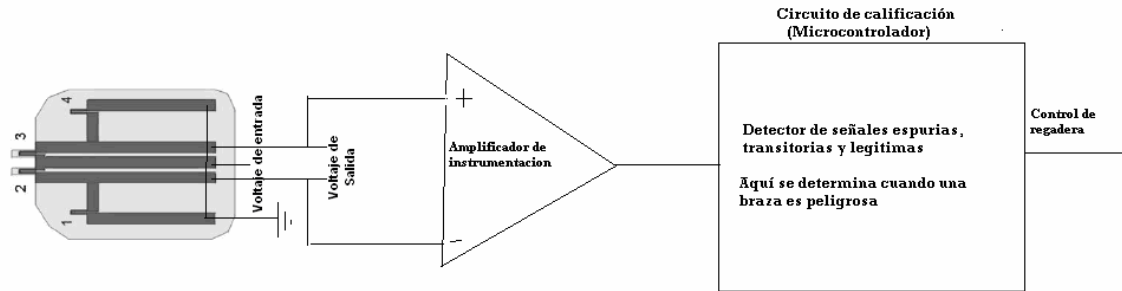


Figura 7.7 Instrumentación del microcantilever

De lo expuesto anteriormente se muestra en la tabla 7.1 las características del microsensor.

Tabla 7.1 Características del microsensor

Vision de campo	90°
Tiempo de respuesta	40ms
Sensitividad	0.025 m/W
Respuesta espectral	0.75 μm a 2.5 μm
Relación señal a ruido	45

Otro aspecto a considerar.

Este trabajo ha tenido como objetivo el diseño de un sensor de brazas y para esto, se han desarrollado dos modelos: un modelo analítico y un modelo de elemento finito, los que han servido para el diseño del sensor de brazas, también se ha dado la guía para su construcción, pero para que este dispositivo pueda operar en una forma practica requiere de su empaquetamiento, en las características del sensor de brazas dadas en los

párrafos anteriores no se ha considerado esto; dentro del mundo de las micromáquinas la cuestión del empaquetamiento, no es una tarea trivial ya que generalmente estas micromáquinas deben interactuar con el mundo exterior, aquí se sugiere una guía breve para el empaquetado.

Este tipo de sensor requiere un empaquetamiento óptico al vacío. Para lograr la máxima señal, el microcantilever debe estar aislado térmicamente. En adición a un gran soporte térmicamente aislado, el dispositivo debe ser empaquetado al vacío para minimizar la conducción térmica a través del ambiente de un gas (aire).

Este dispositivo se puede montar en un receptáculo hecho de cerámica de alúmina. El paquete se puede sellar con una cubierta transparente antirreflectiva de sílice el cual es un material óptico ideal para formar una ventana en esta aplicación ya que es transparente en un gran rango espectral (ultravioleta medio, visible e infrarrojo cercano), zona de trabajo del microcantilever, ver figuras 2.9 y 7.8, este material de sílice tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y es resistente a raspaduras y cambios bruscos de temperatura.

Para mejorar la selectividad del espectro de detección del microcantilever se recomienda agregar un filtro detrás de la ventana de sílica para separar el espectro visible del espectro infrarrojo ver figura 7.9. Con este par de materiales se mejora la sensibilidad en el rango de $0.8\mu m$ a $2.0\mu m$. En la figura 7.10 se muestra el conjunto de materiales propuesto para el empaquetado.

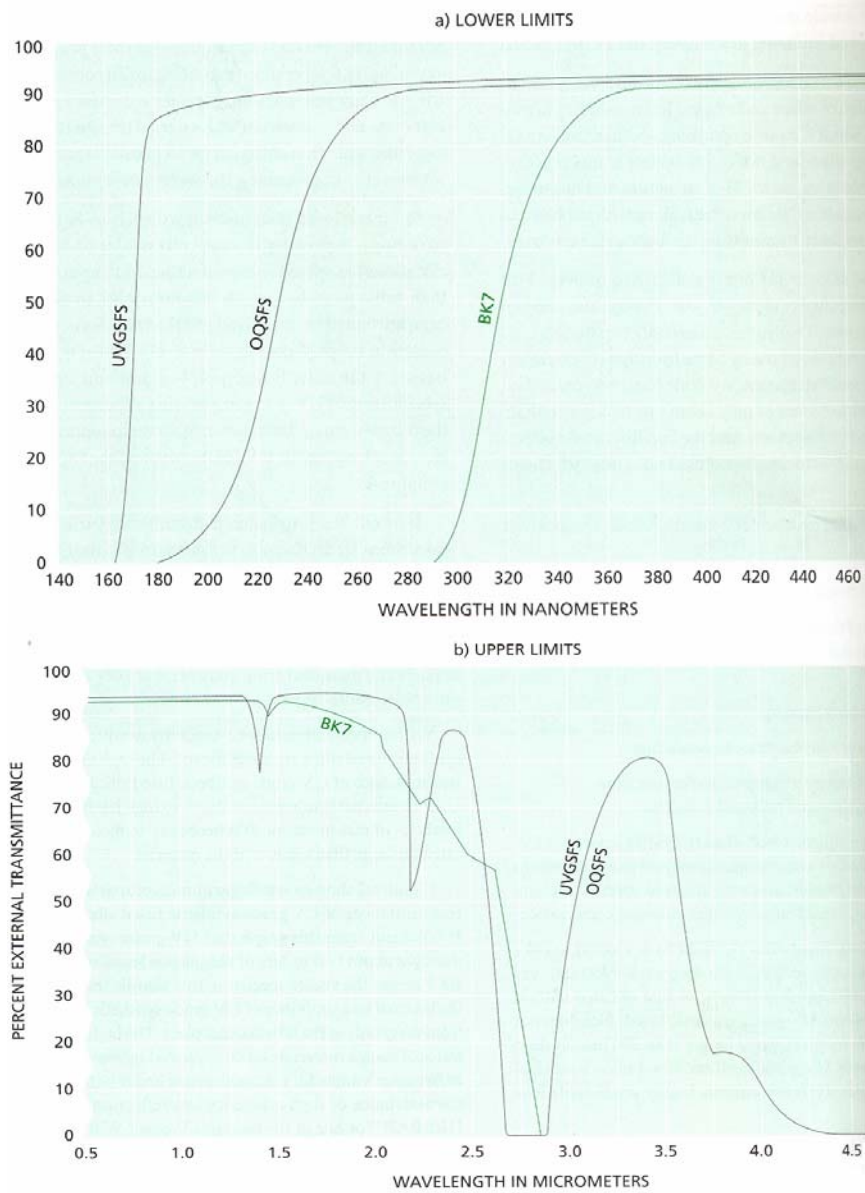
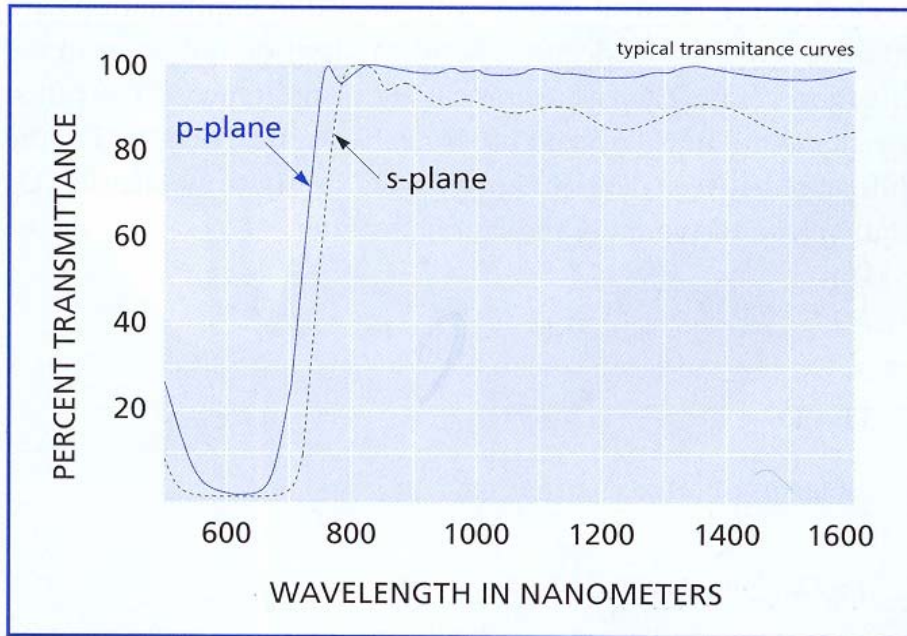


Figura 7.8 Ancho de banda de la ventana de sílice, material BK7 [31].



03 BDL visible-IR beamsplitters/filters

Figura 7.9 Frecuencia de corte del filtro [31].

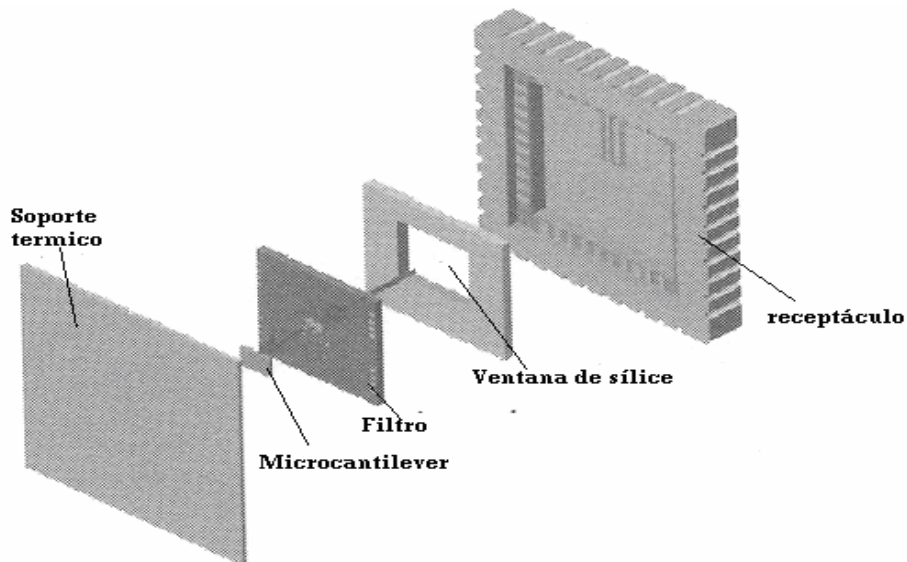


Figura 7.10 Materiales propuestos para el empaquetado del microcantilever

Capítulo 8. Conclusiones.

En este trabajo se desarrollo un modelo analítico de un microsensor basado en un microcantilever bicapa. Lo interesante de este modelo es que puede usarse directamente en diferentes aplicaciones, en este trabajo fue la aplicación del microcantilever como un sensor de energía térmica generada por radiación infrarroja para usarse en la detección de brasas, pero este mismo modelo puede aplicarse para un sensor químico que se base en un fenómeno endotérmico por ejemplo la detección de un thiol. El modelo se desarrollo a partir de las ecuaciones cinemática, constitutiva, fuerza resultante y equilibrio. La validez de este modelo se sustenta en la comparación de este, con la de un modelo computacional como el del método de elemento finito y cuyos resultados son muy similares en ambos confirmando así la validez de este.

El modelo determina la deflexión del microcantilever para una determinada potencia absorbida, la medición de esta deflexión se basa en un lector de salida construido con un material piezorresistivo. Para usar este piezorresistor se desarrollaron las expresiones analíticas para la sensibilidad como función del esfuerzo en un plano isotrópico. Este tipo de lector de salida permite la construcción de instrumentos portátiles.

Se propone un proceso batch para la construcción del microcantilever lo que permite que este tipo de sensores se de bajo costo, ya que en un solo proceso se construyen muchos a la vez, lo cual lo puede hacer competitivo comparado con otro tipo de sensores, sin embargo también se deberá de considerar el costo del empaquetado.

Finalmente se puede decir que este diseño no es más que una parte del desarrollo de un producto, el modelo y la simulación necesitan cambios según se avance desde el concepto hasta obtener un producto maduro (incluyendo el empaquetado).

Los conceptos de la primera fase del diseño es la síntesis del diseño, la cual requiere información de que parámetros son importantes en el diseño, como interactúan entre ellos y la sensibilidad del desempeño del dispositivo para las variables de diseño. Este tipo de información puede obtenerse mas fácilmente de un modelo analítico o un modelo de parámetros concentrados del dispositivo. En este tipo de modelos, las variables de diseño de interés

son frecuentemente explícitas y un gran número de cálculos para determinar la relación entre variables y la sensibilidad pueden llevarse a cabo. Que es lo que se ha hecho en este trabajo.

El análisis de detallado del diseño de MEMS existente para llevar a cabo un diseño óptimo, puede requerir cálculos de análisis numérico de alto orden. Este tipo de modelado no es viable con las aproximaciones de síntesis de diseño y requiere modelos sólidos de alto orden de efectos detallados tales como amortiguamiento de los materiales e histéresis.

Bibliografía.

- [1] Marc J. Madou *Fundamentals of Microfabrication*. The Science of Miniaturization. 2o. Edition 2001. CRC
- [2] Gregory T.A. Kovacs. *Micromachined Transducers Sourcebook* 1998. McGraw Hill.
- [3] John A. Pelesko. *Modeling MEMS and NEMS*. 2000. Chapman & Hall/CRC.
- [4] Julian W. Gardner *Microsensors, MEMS, and Smart Devices*. 2001. John Wiley.
- [5] Mohamed Gad-el-Hak. *The MEMS Handbook*. 2001. CRC.
- [6] Ljubisa Ristic. *Sensor Technology and Devices* 1994. Artech House.
- [7] Nadim Malu. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. 2000. Artech House.
- [8] Xavier P. V. Maldague. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. 2001. John Wiley.
- [9] Yunus A. Cengel. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. 2001 Mc Graw Hill.
- [10] Richardson Moore. *National Fire Alarm Code Handbook* 2002. NFPA.
- [11] E. Obermeier and P. Kopystynski. Piezoresistance in polysilicon and its applications. *Sensors and Actuators A*, 30:149-155, 1992
- [12] Di Lalla N. Películas Selectivas de Cr_2O_3 Negro para Absorbedores Fototermicos. *AVERMA* Vol 5, No.2. 2001
- [13] Pavlovic T. and Ingatiev Optical Properties of Selective Anodically Coated Electrolytically Aluminium Surfaces. *Solar Energy Materials* 16, 319-331. 1987.

- [14] S.R Manalis, S.C. Minne, C.F. Quate, G.G. Yaralioglu, and A. Atalar, Two- dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, pp. 3311-3313, 1997
- [15] MI-YOUNG and S.S. CHOI. Fabrication of bimetallic cantilevers and its characterization. *Surface Review and Letters*, Vol 6, No 6 1195-1199
- [16] G. Binning, C.F. Quate, and C. Gerber. Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56(9):930-3, 1986.
- [17] P. G. Datskos, P. I. Oden, T. Thundat, E. A. Wachter, R. J. Warmack, and S. R. Hunter, *Appl. Phys. Lett.* 69, 2986 (1996)
- [18] P. G. Datskos, S Rajic, and I. Datskou, *Appl. Phys. Lett.* 73, 2319 (1998).
- [19] P.I Oden, P. G. Datskos, T. Thundat, “Uncooled thermal imaging using piezoresistive microcantilever,” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 69, pp. 3277-3279 (1996).
- [20] J. R. Barnes, S. J. Stephenson, M. E. Welland. Ch. Gerber, and J. K. Gimzewski, “Photothermal spectroscopy with femtojoule sensitive using a micromechanical device,” *Nature*, vol. 72, pp. 79-82, 1994
- [21] H. Jensenius, J. Thaysen, A.A. Rasmussen, L.H. Veje, O. Hansen, and A. Boisen. A microcantilever-based alcohol vapor sensor-application and response model. *Applied Physics Letters*, 76(18):2615-17, 2000.
- [22] J. Thaysen, A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra. Atomic force microscopy probe with piezoresistive read-out and highly symmetrical wheatstone bridge arrangement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 83(1-3):47-53, 2000.
- [23] M. Sepaniak, P Datskos, N Lavrik. Microcantilever Transducers: A new approach in sensor technology. *Analytical Chemistry*. November 1, 2002.
- [24] [www.xenics.com/DOC/Infrared technology](http://www.xenics.com/DOC/Infrared%20technology)
- [25] COVENTOR. Designer Reference Guide & Tutorial version 2003.1

[26] R. Allan. MEMS Design Gear Up For Greater Commercialization. *Electronic Design*. June 12, 2000

[27] Warren C Young. *Roark's Formulas for Stress & Strain*. Sixth Edition. 1989. Mc Graw Hill.

[28] James J. Allen. *Micro Electro Mechanical Systems Design*. 2005. CRC. Taylor & Francis.

[29] Stephen D. Senturia. *Microsystem Design*. 2002 Kap.

[30] Cornell University. Course of Study ECE 432 MicroElectro Mechanical Systems. Chapter 4. 2003.

[31] Melles Griot. *The Practical Application of Light*. 1999.