



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

**“SENSOR DE PRESIÓN CAPACITIVO EN
SILICIO MICROMAQUINADO”**

Tesis presentada para obtener el título de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Presenta:

LEONARDO MARTINEZ DIAZ

Asesores:

DR. SALVADOR ALCÁNTARA INIESTA
DR. JOSÉ JOAQUÍN ALVARADO PULIDO



Puebla, Pue. Diciembre 2015

Agradecimientos

A mis asesores por toda su ayuda, consejos y principalmente por su paciencia.

A dos grandes amigos Sabino y Juan, por su apoyo.

A todas las personas que de manera consciente o inconscientemente me ayudaron a terminar este trabajo.

A L.M.C. gracias por todo.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo la fabricación de un microsensor de presión capacitivo, mediante la aplicación de la técnica de Micromaquinado, cuya finalidad es la detección de las presiones fisiológicas típicas de una persona adulta. El trabajo involucra el diseño del proceso tecnológico, desde la obtención de las mascarillas para el fotolitografado, hasta el micromaquinado del silicio, la definición de las características físicas del sensor y el análisis mecánico y eléctrico, que permita entender, simular y evaluar el funcionamiento del dispositivo.

Mediante el diseño de la estructura y la fabricación del elemento sensitivo del sensor, se obtendrá un sensor capacitivo cuadrado de $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 280\mu\text{m}$ con una masa móvil de $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 280\mu\text{m}$, que sea susceptible a los cambios de presión dentro de un rango de 0 a 40kPa (0-300mmHg).

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
OBJETIVOS.....	6
JUSTIFICACIÓN	7
INTRODUCCIÓN.....	8
I.1 SISTEMAS MICRO-ELECTRO-MECÁNICOS (MEMS).	8
<i>I.1.1 Sensores de presión capacitivos MEMS.</i>	10
<i>I.1.2 Aplicaciones biomédicas.</i>	11
I.2 PRESIÓN FISIOLÓGICA.	12
<i>I.2.1 Presión arterial.</i>	12
<i>I.2.2 Presión intraabdominal.</i>	13
<i>I.2.3 Presión intraocular.</i>	13
<i>I.2.4 Presión intrauterina.</i>	13
<i>I.2.5 Presión intracraneal.</i>	13
1. SILICIO COMO MATERIAL DE TRABAJO EN LA FABRICACIÓN DE MEMS.	15
1.1 SILICIO CRISTALINO.....	15
<i>1.1.1 Silicio monocristalino.</i>	16
<i>1.1.2 Silicio policristalino.</i>	17
1.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS OBLEAS.....	17
1.3 SILICIO TIPO N Y P.	18
<i>1.4 Obleas de silicio tipo n y p utilizadas en la fabricación del sensor capacitivo.</i>	19
CAPÍTULO 2.....	20
2. DISEÑO DEL SENSOR CAPACITIVO: MODELADO Y SIMULACIÓN.	20
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SENSOR.....	20
2.2 ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA.	24
<i>2.2.1 Primera aproximación.</i>	25
<i>2.2.2 Segunda aproximación.</i>	27
<i>2.2.3 Análisis y simulación de la estructura fabricada.</i>	28
<i>2.2.4 Análisis de Capacitancia respecto a desplazamiento.</i>	31
3. FABRICACIÓN DEL SENSOR APLICANDO LA TÉCNICA DE MICROMAQUINADO.	34
3.1 MASCARILLAS.	35
<i>3.1.1 Ecuaciones para la definición de las ventanas.</i>	35
<i>3.1.2 Diseño de mascarillas.</i>	36
<i>3.1.3 Impresión de las mascarillas.</i>	40
<i>3.1.4 Alineación de mascarillas.</i>	41
3.2 LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS.	45
<i>3.2.1 Elaboración de solución Piraña.</i>	45
<i>3.2.2 Limpieza con Piraña.</i>	45
<i>3.2.3 Sumergir en HF.</i>	45
<i>3.2.4 Sumergir en acetona y alcohol.</i>	46
<i>3.2.5 Secado en horno.</i>	46

3.3 FOTOLITOGRAFÍA.....	46
3.3.1 Depósito de resina positiva.....	46
3.3.2 Precocido.....	47
3.3.3 Exposición.....	47
3.3.4 Revelado.....	48
3.3.5 Recocido o Hard Baking.....	49
3.4 APERTURA DE VENTANAS EN EL SiO ₂	49
3.4.1 Elaboración de la solución.....	50
3.4.2 Ataque y monitoreo.....	50
3.4.3 Remoción de la resina.....	50
3.5 ATAQUE CON KOH.....	51
3.5.1 Solución.....	52
3.5.2 Razón de ataque - Si y SiO ₂	52
3.5.3 Cálculo de tiempos de ataque.....	53
3.5.4 Maquinado.....	54
3.6 REMOCIÓN DE ÓXIDO EN EL BOSS.....	55
3.7 CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS.....	56
3.7.1 Primera arquitectura.....	56
3.7.2 Segunda arquitectura.....	56
3.7.3 Elaboración de contactos.....	56
3.8 RESUMEN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL ELEMENTO SENSITIVO.....	59
CAPÍTULO 4.....	64
4. RESULTADOS.....	64
4.1 MEDICIÓN DEL ESPESOR DEL DIAFRAGMA.....	64
4.2 MEDICIÓN DE LA CAPACITANCIA PARA LAS DOS ARQUITECTURAS EMPLEADAS.....	65
4.3 MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL BOSS Y OBTENCIÓN DE LA CONSTANTE DE RESTITUCIÓN DEL DIAFRAGMA.....	66
CONCLUSIONES.....	70
TRABAJO A FUTURO.....	71
ANEXO 1.....	74
RESUMEN DE LA TÉCNICA DE MICROMAQUINADO.....	74
ANEXO 2.....	77
PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA FABRICACIÓN DE MEMS MEDIANTE LA TÉCNICA DE MICROMAQUINADO.....	77
MASCARILLAS.....	77
<i>Ecuaciones para la definición de las ventanas.....</i>	<i>77</i>
<i>Diseño de mascarillas.....</i>	<i>78</i>
<i>Impresión de las mascarillas - Fotomecánica.....</i>	<i>78</i>
LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS.....	79
FOTOLITOGRAFÍA.....	79
APERTURA DE VENTANAS EN EL SiO ₂	80
ATAQUE CON KOH.....	81
<i>Razón de ataque - Si y SiO₂.....</i>	<i>81</i>

Objetivos

Objetivo general:

Fabricar el elemento sensitivo de un sensor capacitivo de detección de presiones fisiológicas, mediante la técnica de Micromaquinado.

Objetivos específicos:

- Definir la geometría del diafragma y las dimensiones del sensor capacitivo, de acuerdo a las reglas de diseño y limitaciones del proceso de fabricación.
- Definir los pasos para la fabricación del modelo de sensor capacitivo.
- Utilizar un modelo matemático que brinde una visión preliminar del comportamiento del elemento sensitivo en desplazamiento y capacitancia.
- Realizar la simulación de desplazamiento del elemento sensitivo, bajo una presión de 40kPa.
- Realizar la simulación de capacitancia respecto al desplazamiento para el modelo del sensor capacitivo.

Justificación

Para una primera aproximación a la investigación de fenómenos, desarrollo de nuevas tecnologías o aplicaciones de dispositivos microelectromecánicos, el uso de los métodos comerciales de fabricación puede no ser la mejor opción debido a los recursos, tiempos, tecnologías, costos, entre otros factores. Por lo que una técnica de fabricación más flexible que permita obtener resultados preliminares satisfactorios puede ser una buena alternativa para cualquier persona interesada en el estudio y desarrollo de MEMS y sus aplicaciones.

Mediante esta técnica, denominada Micromaquinado, se pueden elaborar sistemas microelectromecánicos funcionales en un tiempo relativamente corto (dependiendo de la complejidad del dispositivo a fabricar). Además, permite realizar numerosos dispositivos para aplicaciones específicas gracias a la flexibilidad con que un proceso de fabricación es reproducible y al mismo tiempo manipulable para ajustarse a las necesidades y características del dispositivo.

De entre los sistemas que son más factibles de fabricar se encuentran aquellos cuyo principio se base en capacitores de placas paralelas, los cuales se pueden fabricar de tal manera que, mediante la variación de la distancia entre las placas, permita la detección de diversos fenómenos físicos.

Estos sensores capacitivos se usan ampliamente en la industria y en laboratorios para medir diferentes variables físicas tales como la posición, velocidad y aceleración de objetos en movimiento, fuerza, presión, flujo, nivel de líquidos y propiedades dieléctricas de materiales, entre otros. Por lo que, esto son ampliamente utilizados en aplicaciones de automoción, control de procesos y biomedicina.

En específico, para muchas aplicaciones biomédicas, la técnica de detección capacitiva se utiliza principalmente debido a su alta sensibilidad, las cuales pueden incluir la medición de la presión arterial, la presión intraocular, la presión intracraneal, frecuencia del pulso, la presión intrauterina, abdominal y la presión urinaria.

Este tipo de sensores suelen utilizar un diafragma, ya sea circular o cuadrado, como su principal elemento de detección. Una presión aplicada sobre el diafragma provoca su deflexión, lo que propicia un cambio en la distancia entre las placas del capacitor, generando una variación de capacitancia. El rango de presión que se puede medir por el diafragma, depende de sus dimensiones (superficie y espesor), geometría (forma cuadrada o circular) y materiales. Mientras que en aplicaciones biomédicas, específicamente para medir la presión arterial y la frecuencia cardíaca se requiere que estos sensores operen en el rango de 0-40 kPa (0-300 mmHg).

Introducción

Las tecnologías existentes para la fabricación de sistemas microelectromecánicos requieren de equipos y tecnología altamente especializados para poder garantizar la mayor calidad y precisión en los dispositivos fabricados. Las empresas que utilizan estas tecnologías de primer nivel, cuentan con la infraestructura y recursos necesarios que les permiten fabricar una gran cantidad y variedad de dispositivos que cumplan con las necesidades del cliente.

Estas empresas dedicadas a la fabricación de MEMS garantizan una gran precisión en el proceso de fabricación, lo que sin duda asegura que el producto final cumpla con las especificaciones y requerimientos del cliente, sin embargo los costos de producción, las fechas y tiempos, así como las características y reglas que son establecidas por el fabricante, hacen que esta opción de fabricación de MEMS no sea la más adecuada para determinados sectores y para determinadas aplicaciones.

La diferencia entre estas empresas y un laboratorio propio es que con el equipo que se cuenta no se logra alta resolución durante el proceso de fabricación. Ante la falta de equipo sofisticado y especializado, la aplicación de la técnica de Micromaquinado enfrenta dificultades para fabricar dispositivos en grandes cantidades y con la misma precisión en todos los elementos desarrollados. Sin embargo, la técnica propuesta es suficiente para la elaboración de dispositivos funcionales que nos permitan involucrarnos en el desarrollo, fabricación y análisis de los sistemas microelectromecánicos (MEMS) ajustando y mejorando los procesos, capitalizando la experiencia.

I.1 Sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS).

El potencial de las micro-máquinas fue apreciado mucho antes de que existiera la tecnología que pudiera construirlas, fue en 1960 cuando el Dr. Richard Feynman presenta su artículo "There is Plenty of Room at the Bottom", en el cual habla de las ventajas de producir micro-máquinas y especula sobre algunos de sus posibles usos, además de motivar y desafiar a la sociedad para desarrollar dispositivos de este tipo, [1].

Los sistemas microelectromecánicos, comúnmente denominados MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems por sus siglas en inglés), son dispositivos del orden de micrómetros (unidad de medida que representa una millonésima parte de un metro) que se conforman de elementos mecánicos y eléctricos y que trabajan como transductores o actuadores. Los MEMS son "micro" porque todas o algunas de sus dimensiones están en el orden de micrómetros, son "electro" porque estos sistemas utilizan energía eléctrica como fuente de alimentación, como medio de

comunicación o como medio de detección; y son “mecánicos” porque utilizan elementos mecánicos para la detección o actuación. Finalmente son “sistemas” porque constan de diferentes elementos que trabajan en conjunto para realizar una misma tarea (como sensor o como actuador). Son la integración de elementos mecánicos, electrónica, sensores y actuadores en un sustrato común de silicio mediante una tecnología de microfabricación, [2], [3].

Podemos enfatizar algunos aspectos importantes sobre los MEMS. Primero, que la mayoría de los MEMS son básicamente, sensores y actuadores. Por ejemplo, los sensores inerciales (acelerómetros o giroscopios), sensores de presión, masa, temperatura, fuerza y muchos otros; comúnmente los sensores responden a excitaciones externas mediante una señal eléctrica controlada. Son actuadores porque podemos fabricar microespejos para reflejar la luz en las pantallas planas de los televisores, microgrippers (micro pinzas) y, en general, actuadores para fuerza y desplazamiento comunes, a los cuales se les aplica una excitación externa como una diferencia de potencial, dando como resultado el desplazamiento de un elemento micromaquinado.

Segundo, el silicio es el punto focal de esta tecnología, los sustratos de silicio son usados comúnmente como plataformas donde los MEMS son construidos y unidos eléctricamente; aunque se han estado desarrollando nuevos materiales como polímeros conductores. Los procesos para la fabricación microelectrónica a partir del silicio han sido adoptados o modificados para los procesos de fabricación de MEMS. Además, los dispositivos fabricados sobre silicio pueden ser integrados fácilmente a componentes electrónicos.

Tercero, las tecnologías de microfabricación permiten elaborar numerosos dispositivos al mismo tiempo, una oblea puede contener cientos o miles de dispositivos MEMS, por lo que la producción (batch fabrication) de miles de dispositivos se puede lograr a un bajo costo. Sin embargo, alcanzar este nivel de producción requiere de investigación y optimización en cada paso de los procesos de fabricación para alcanzar un nivel de producción estable y rentable.

Cuarto, cada elemento que conforma un MEMS tiene que ser considerado y diseñado a la par que se diseña el sistema en general. El ensamblaje o postprocesado de componentes individuales de un mismo MEMS, representa un gasto de recursos, tiempo y dinero mayor a que si dentro de un solo proceso se incluyen estos elementos. No solamente el microsistema debe de ser diseñado con cada uno de los elementos que lo compongan, también el proceso de fabricación debe de ser diseñado a la par del dispositivo, en caso contrario el diseño puede resultar insuficiente y el dispositivo no se podrá fabricar, [3].

Las grandes ventajas que presentan estos sistemas como su bajo costo, tamaño, bajo consumo energético, la posibilidad de fabricar en grandes cantidades, peso, la diversidad de dispositivos que se pueden fabricar, la posibilidad de tener varios dispositivos funcionando en un espacio reducido, la oportunidad de implementar dispositivos en múltiples sectores, la vida útil entre otras, generan fascinación e interés y abren un mundo lleno de oportunidades, [4].

Existe un amplio campo de aplicación para los MEMS, y los sensores son un gran ejemplo de la versatilidad y de las muchas ventajas que presenta la tecnología MEMS. Los sensores MEMS están presentes en prácticamente cualquier área, son elementos importantes en sistemas automotrices, sistemas electrónicos, robótica, en la computación, en equipos médicos y aplicaciones biomédicas. Por mencionar algunas de sus aplicaciones tenemos:

- El monitoreo de estructuras complejas como aeronaves, en donde existe una gran cantidad de variables que pueden comprometer su integridad estructural.
- En la ingeniería civil, el monitoreo de puentes antes diversas cargas móviles es de gran importancia para la integridad de la estructura y para la seguridad de las personas.
- En el área automotriz el uso de sensores para el constante monitoreo del automóvil y usuarios, como acelerómetros para la activación de las bolsas de aire.
- En el área de medicina el uso de sensores MEMS para el monitoreo del cuerpo humano, como lo sensores para el ritmo cardiaco.

I.1.1 Sensores de presión capacitivos MEMS.

Dentro de los MEMS una de las áreas más estudiadas es el de los sensores de presión, en estos días podemos encontrar este tipo de sensor desde los cartuchos de tinta hasta los medidores de presión arterial. Los sensores de presión convierten energía mecánica de la presión en una señal eléctrica como corriente, voltaje o capacitancia.

Los sensores capacitivos pueden medir de manera directa una gran variedad de variables tales como: movimiento, composición química, campo eléctrico. Mientras que de manera indirecta muchas otras variables pueden ser convertidas a movimiento o constante dieléctrica como puede ser la presión, aceleración, nivel de flujo, composición de fluido. Estos sensores están construidos con electrodos conductores sensitivos que convierten la variación de capacitancia en voltaje, frecuencia o variación de ancho de pulso de acuerdo a como estén implementados. De acuerdo con lo anterior se puede observar que el campo de aplicación de los sensores capacitivos es extraordinariamente extensa, [4], [5].

Los sensores de presión piezorresistivos son de bajo costo pero requieren extensos procesos de calibración y compensación debido a que su rango de salida es muy bajo (10-100 mV), además de tener una deriva térmica grande. Para hacer frente a estas limitaciones, una alternativa es el uso de sensores de presión micromaquinados de efecto capacitivo gracias a que este tipo de sensores tienen más características controlables y un rango de salida mayor. Los sensores capacitivos tienen mayor sensibilidad, menor dependencia de la temperatura, pueden trabajar ante excitaciones oscilatorias y en general permiten aprovechar diversas características de los capacitores para la detección.

El principio básico de un sensor capacitivo es la detección del cambio de la distancia entre dos placas paralelas, generalmente una es fija mientras la otra es móvil, un cambio de presión en una de las placas causa un cambio de capacitancia siendo este cambio proporcional a la presión y típicamente es un porcentaje pequeño de la capacitancia total. La capacitancia puede ser monitoreada por medio del cambio de frecuencia de un oscilador o para variar el acoplamiento de una señal de corriente alterna. Los sensores capacitivos micromaquinados tienen capacitancias del orden de picofaradios o menores lo que los vuelve susceptibles a una pérdida de señal a causa de las capacitancias parásitas; la mayoría de los sensores utilizan diafragmas delgados y áreas grandes para que la sensibilidad sea suficiente para poder detectar pequeñas variaciones de presión causadas por diversas perturbaciones fisiológicas, lo que los vuelve aptos para aplicaciones biomédicas, [3], [4], [5].

I.1.2 Aplicaciones biomédicas.

Los sensores de presión capacitivos son ampliamente usados en aplicaciones biomédicas, los cuales son por lo general capacitores de placas paralelas debido a sus grandes ventajas como la miniaturización, bajo poder de consumo, fácil medición; estos sensores están diseñados para operar en un rango de 0 a 300 mmHg y son comúnmente usados para medición de presión sanguínea y ritmo cardíaco. La medición de la presión puede realizarse mediante una comparación entre una capacitancia generada por la presión a medir, y una capacitancia de referencia causada por una presión conocida, por ejemplo la presión atmosférica.

Para fabricar un sensor de presión absoluta, la presión de referencia se encuentra en una microcavidad sellada dentro del sensor y es menor a 1mBar. El circuito de lectura trabaja con $100\mu A$ y 3.5V, se logra un rango de medición de 600fF mediante un circuito de pre-procesado de señales para después ser transmitido mediante telemetría, [4], [5].

En la práctica, es de mucha utilidad que estos sensores detecten cambios de capacitancia muy pequeños para poder detectar en tiempo real las pequeñas variaciones de presión en el cuerpo humano. El método de medición por presión

diferencial permite lograr este objetivo, aunque las mediciones realizadas en diversas aplicaciones biomédicas se realizan normalmente con presión absoluta.

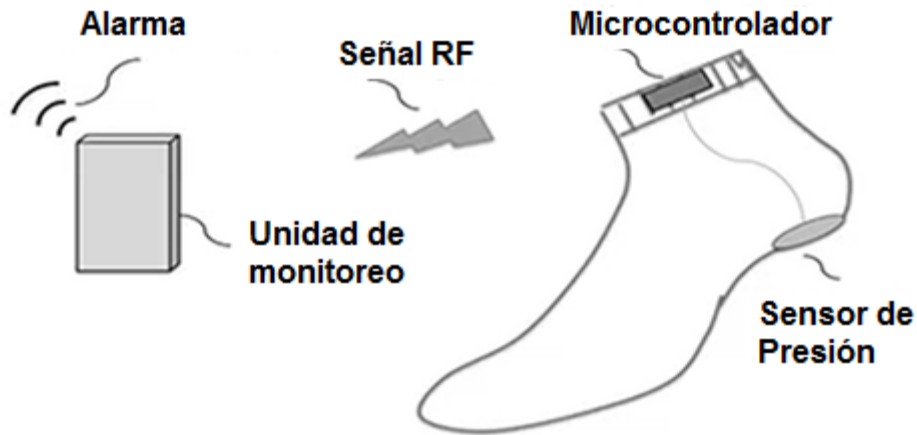


Figura 1.1 Sensor de presión utilizado para monitorear las actividades nocturnas de pacientes con Alzheimer, diseño de Kenneth Shinozuka. El prototipo consta de un sensor que detecta la presión generada por el peso del paciente, un microcontrolador que procesa la señal generada por el capacitor y la transmite inalámbricamente a una unidad de monitoreo que activa una alarma.

I.2 Presión fisiológica.

Medir las diferentes presiones que se encuentran en el cuerpo humano es de gran interés tanto para médicos como para investigadores, ya sea para análisis o estudios las presiones fisiológicas de interés incluyen la medición de la presión arterial, la presión intraocular, la presión intracraneal, frecuencia del pulso, la presión intrauterina, abdominal y la presión urinaria, también es de interés la presión central venosa, la presión sanguínea intracardiaca y casos especiales como la presión en la arteria pulmonar, las presiones de los fluidos espinales y las presiones intraventriculares del cerebro, [6]. Algunos tipos de presión fisiológica son:

I.2.1 Presión arterial.

Es la presión que se ejerce en las paredes de las arterias causada por la sangre bombeada por el corazón y está determinada por el volumen y la fuerza con que ésta es bombeada, así como, por el área transversal y la flexibilidad de las arterias. Debido a que el bombeo cardíaco es pulsátil, la presión arterial alterna entre la presión sistólica, que es de 120 mmHg cuando el corazón se contrae para bombear la sangre, y de 80 mmHg para la presión diastólica, la cual se da cuando el corazón se expande para llenarse con sangre (valor máximo y mínimo promedio para una persona adulta). La medición de la presión arterial es una de las más fáciles de realizar debido a que puede ser de manera no invasiva mediante un esfigmomanómetro, [6], [7].

I.2.2 Presión intraabdominal.

Es la presión normal en la cavidad abdominal que en condiciones normales el valor oscila entre 0 mmHg (o incluso valores sub-atmosféricos) a 5 mmHg. Diversos factores como la respiración, la tos, estornudos, el embarazo, la obesidad, cirugía, la elasticidad de las paredes abdominales o el contenido abdominal causan cambios en la presión, por lo que puede estar entre valores sub-atmosféricos a valores cercanos a los 10 mmHg (para valores mayores, se considera hipertensión intraabdominal). El método validado para la medición de este tipo de presión, es mediante una sonda vesical, este método es poco invasivo y permite realizar monitoreo de la presión de manera continua o intermitente, [8].

I.2.3 Presión intraocular.

Es la presión que ejercen los líquidos intraoculares contra la pared del ojo, esta se mantiene constante mediante el equilibrio que existe entre la producción y eliminación de líquido en la parte anterior del ojo, denominado humor acuoso. Un desequilibrio entre la producción y la reabsorción o eliminación del humor acuoso pueden causar un aumento de la presión intraocular. El valor promedio de la presión intraocular oscila entre los 10 y 21 mmHg y valores por encima representan una hipertensión ocular o puede ser signo de glaucoma. El método utilizado para la medición de la presión es mediante la tonometría, en donde se realiza una presión en la córnea con un tonómetro, dispositivo en forma de lápiz, y se realiza la medición con respecto al aplanamiento de la córnea, [9].

I.2.4 Presión intrauterina.

Presión generada dentro del útero, durante el parto en la etapa de dinámica uterina se monitorean el tono basal, que es la presión mínima generada por el útero en reposo y oscila entre 8 y 12 mmHg, y la intensidad que es la diferencia de presión entre el tono basal y el valor más alto obtenido en una contracción que oscila entre 30 y 50 mmHg. La medición de la presión durante las contracciones puede ser externa mediante palpación (a partir de los 20 mmHg, el endurecimiento del útero es detectable a los 30 mmHg y a los 40 mmHg el útero adquiere una consistencia leñosa); o con tocografía, es externa si se registran las contracciones del útero a través de las paredes abdominales y es interna si se inserta un catéter en la cavidad uterina, [10].

I.2.5 Presión intracraneal.

Es la presión debida a la interacción entre el cerebro, cráneo y el líquido cefalorraquídeo que oscila entre 1 y 15 mmHg; un aumento en la presión del líquido cefalorraquídeo, inflamación del cerebro, algún tumor o derrame cerebral, coágulos, convulsiones entre otros causan graves problemas al sistema nervioso central. La

medición de la presión puede ser mediante un catéter intraventricular insertado a través de un orificio en el cráneo; se puede colocar un transductor en el espacio subdural; también se puede utilizar un sensor epidural a través de un orificio en el cráneo, [11].

En la siguiente tabla se resumen los tipos de presión fisiológica.

Tabla Tl.1 Presión fisiológica.

Tipo de presión	Descripción	Valores	Medición	Comentarios
Arterial	Presión que se ejerce en las paredes de las arterias causada por la sangre bombeada por el corazón.	Para una persona adulta el valor promedio es de 120 (sístole) y 80 (diástole) mmHg.	La medición no invasiva se realiza usando un esfigmomanómetro.	Dos valores se toman en cuenta, cuando el corazón se contrae para expulsar la sangre y cuando se expande para llenarse de sangre.
Intraabdominal	Es la presión normal en la cavidad abdominal.	En condiciones normales oscila entre 0 y 5 mmHg.	Mediante una sonda vesical se puede medir de manera continua o intermitente.	Diversos factores como la respiración, la tos, estornudos, el embarazo, la obesidad o cirugía causan cambios en los valores típicos.
Intraocular	Es la presión que ejercen los líquidos intraoculares contra la pared del ojo.	El valor promedio de la presión intraocular oscila entre los 10 y 21 mmHg.	Mediante la tonometría, se realiza una presión en la córnea para realizar la medición.	Un desequilibrio entre la producción y la reabsorción o eliminación del humor acuoso pueden causar un aumento de la presión intraocular.
Intrauterina	Es la presión generada dentro del útero.	En reposo oscila entre 8 y 12 mmHg. Durante las contracciones oscila entre 30 y 50 mmHg.	Mediante palpación o por tocografía.	La tocografía puede ser externa si se monitorea las paredes abdominales, o interna mediante un catéter.
Intracraneal	Es la presión debida a la interacción entre el cerebro, cráneo y el líquido cefalorraquídeo.	Oscila entre 1 y 15 mmHg.	Mediante un catéter intraventricular o un sensor epidural.	Un aumento en la presión del líquido cefalorraquídeo, inflamación del cerebro, algún tumor otras cosas causan graves problemas al sistema nervioso central.

Capítulo 1

1. Silicio como material de trabajo en la fabricación de MEMS.

La fabricación de dispositivos empieza con una pieza delgada y plana de material (substrato) sobre o en el cual se crean las estructuras, el material más común utilizado en la fabricación de MEMS es el silicio cristalino. Son las propiedades físicas y químicas del silicio lo que lo vuelve un material versátil para cumplir con las necesidades estructurales, mecánicas y eléctricas en la fabricación de MEMS.

El silicio es el material preferido debido a sus excelentes propiedades térmicas y mecánicas (pequeña expansión térmica, alto punto de fusión, alta dureza, fragilidad y sin comportamiento plástico o histéresis). Además, el silicio se ha usado para la microelectrónica mucho antes de la tecnología MEMS. Por lo tanto, muchos de los procesos típicos para la fabricación de microelectrónica de silicio, han sido adoptados para los MEMS, los cuales pueden integrarse con otros dispositivos electrónicos en el mismo bloque (chip). Aparte de silicio, se pueden utilizar otros materiales para realizar estructuras MEMS, tales como óxido de silicio, nitruro de silicio, polisilicio, arseniuro de galio (GaAs), aluminio, oro, etc, [12].

1.1 Silicio cristalino.

Un arreglo de átomos que se repite a lo largo de un sólido se le denomina estructura cristalina y dependiendo en la forma en cómo se acomodan los átomos se obtienen distintas estructuras, [13]. En total son 14 formas en como los átomos se pueden acomodar en los sólidos cristalinos, en el caso de los semiconductores la familia de cristales más importante es la que está conformada por estructuras cúbicas.

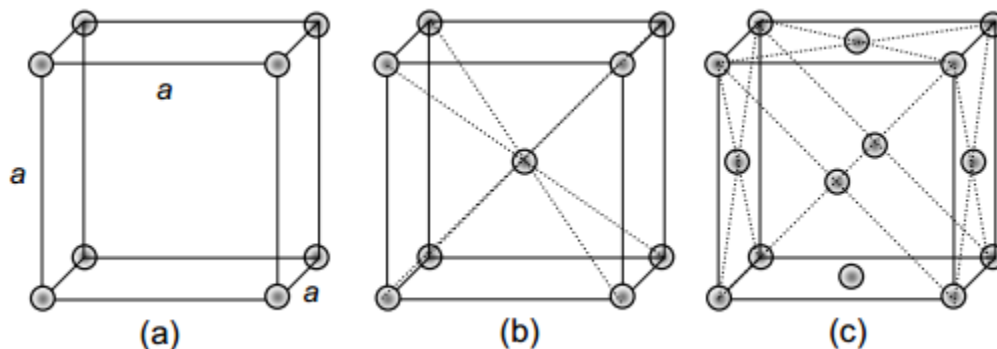


Figura C1.1 Tres tipos de estructura cristalina cúbica: Cúbica simple (a); cúbica centrada en el cuerpo (b) y cúbica centrada en las caras (c).

El silicio presenta una estructura cristalina especial del tipo cubica centrada en las caras parecida a la estructura del diamante, esta estructura es una combinación de dos celdas unitarias cúbicas centradas en las caras, una desplazada en la diagonal principal de la otra. Hay ocho átomos en la estructura, cuatro por cada celda, cada átomo de silicio está rodeado por 4 vecinos cercanos en una configuración tetraédrica con el átomo de silicio original en el centro, [14].

Los átomos en una estructura definen diferentes planos cristalográficos, mediante los índices de Miller podemos identificar estos planos en los cristales. En la estructura cúbica se manejan 3 planos cristalográficos:

- Plano [100]
- Plano [110]
- Plano [111]

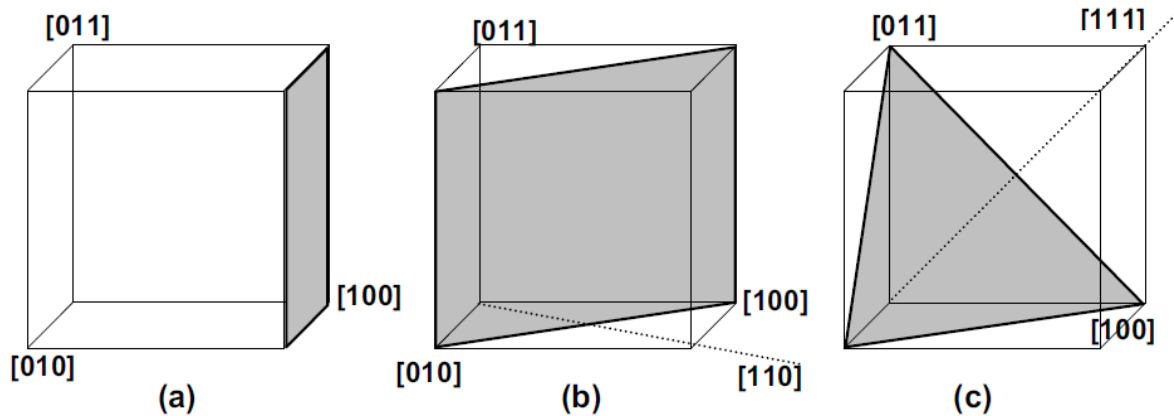


Figura C1.2 Planos cristalográficos: a) [100]; b) [110]; c) [111].

Los sensores de presión se fabrican típicamente con silicio mediante dos técnicas, con silicio monocristalino aplicando la técnica de micromaquinado de volumen y con silicio policristalino mediante la técnica de micromaquinado de superficie.

1.1.1 Silicio monocristalino.

La estructura cristalina primitiva del silicio es un cubo unitario con 8 átomos por celda, es más duro que el acero inoxidable, presenta histéresis a pesar de ser frágil; su límite lineal se extiende casi hasta el punto de fractura, lo que es beneficioso para los dispositivos MEMS, [4], [14]. Básicamente cuatro propiedades son de interés para el diseño de microestructuras, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, el efecto de temperatura y el punto de fractura. A partir de la ley de Hooke, los esfuerzos en una dirección son funciones del estrés en esa dirección así como las tensiones en otras direcciones.

El módulo de Young (E) se define como la constante de proporcionalidad entre un estrés uniaxial en una dirección en particular y la tensión resultante en la misma dirección con los demás estreses igual a cero. Cuando un material sufre una deformación causada por un estrés en una dirección presentan una expansión en direcciones ortogonales, el coeficiente de Poisson es la razón negativa de la tensión en una dirección ortogonal a la dirección del estrés. Estos dos parámetros varían de acuerdo a las direcciones del material. El efecto de aumentar la temperatura en el módulo de Young es el de reducirlo o ablandar al material.

1.1.2 Silicio policristalino

El silicio policristalino son varios granos de silicio monocristalino con fronteras de grano, el tamaño y la textura de la superficie de los granos se determinan por la temperatura, presión y depósito; estas películas tienen características mecánicas dependientes de las condiciones de depósito y recocido. Las películas presentan orientaciones de grano preferenciales de acuerdo a la temperatura, así mismo el módulo de Young depende de la estructura y la orientación de los cristales.

Para el silicio policristalino la fuerza de fractura se decide por dos factores, el tamaño del grano y la energía de fractura superficial. Dado que el tamaño de la dislocación depende del tamaño del grano, mientras más grande sea el grano más energía se necesita para propagar una grieta a través del material, [4], [14].

1.2 Proceso de obtención de las obleas.

El silicio, en la forma de óxido de silicio encontrado en la arena, es el material más abundante en el planeta, sin embargo en esta forma no es idóneo para trabajarlo como sustrato, la mayoría del silicio cristalino utilizado se obtiene mediante el método Czochralski.

En este método se funde silicio altamente puro en un crisol de cuarzo en una atmósfera inerte a una temperatura de entre 1200-1414°C. Un cristal "semilla" se introduce en el material fundido de tal forma que al solidificarse lo hace en forma de cristal en lugar de amorfo o con estructuras granulares. Esto se logra extrayendo lentamente y al mismo tiempo enfriando el material mientras se rota el crisol y la "semilla" en direcciones opuestas; el tamaño del lingote resultante se determina por la temperatura, la rotación y la extracción. Una vez obtenido el lingote este es cortado en discos llamados obleas, sus espesores pueden variar entre 200 a 500 μm con diámetros entre 2 a 12 pulgadas y se pueden ser pulidas en uno o ambos lados con una tolerancia de 2 μm , [2], [12], [15], [16].

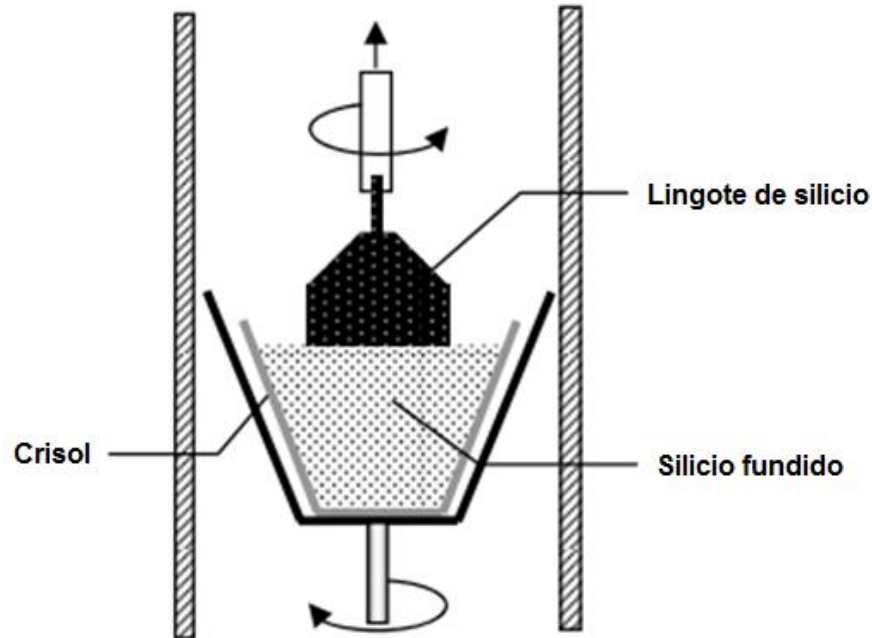


Figura C1.3 Los lingotes de silicio se forman a partir de un cristal "semilla".

1.3 Silicio tipo n y p .

En la producción de semiconductores, el proceso de dopado consiste en agregar impurezas en un semiconductor extremadamente puro (intrínseco) con el fin de variar su resistividad. Las impurezas utilizadas dependen del tipo de semiconductores a dopar, los elementos comúnmente utilizados para dopar al silicio son el Boro, el Arsénico, el Fósforo, y Galio, [2], [15]. Se denomina silicio tipo n cuando al silicio se le agregan átomos de Fósforo y tipo p cuando las impurezas son de Boro.

No obstante, la posibilidad de que al aplicárseles una corriente eléctrica los electrones se puedan mover libremente a través de la estructura atómica de un elemento semiconductor es mucho más limitada que cuando la corriente fluye por un cuerpo metálico buen conductor.

En el silicio tipo n los átomos de Fósforo, los cuales tienen 5 electrones de valencia, sustituyen a átomos de silicio, que tienen 4 electrones de valencia, y otorgan (donan) electrones a la banda de conducción, se dice que tiene exceso de electrones [2], [15].

En el silicio tipo p los átomos de Boro, con 3 electrones de valencia, sustituyen a átomos de silicio y se crea un hueco de carga positiva en la banda de valencia, un cuarto electrón será aceptado para completar el ultimo nivel energético del Boro, [15].

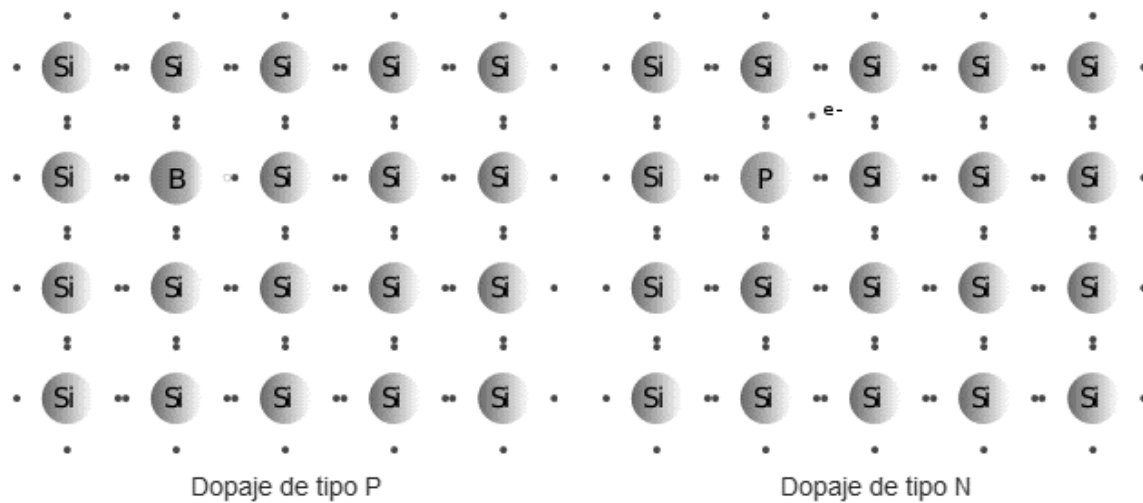


Figura C1.4 El Fósforo aporta un electrón que queda libre en la red cristalina; el Boro “deja” un hueco en el enlace covalente con el silicio.

1.4 Obleas de silicio tipo *n* y *p* utilizadas en la fabricación del sensor capacitivo.

El silicio utilizado para la elaboración del dispositivo tiene las siguientes características.

Tabla T1.1 Características del silicio empleado en la fabricación del sensor.

Obleas de Silicio.	Medidas de la oblea.	Características de la oblea.	Características del silicio.
Tipo <i>n</i>	Diámetro: 5 cm. Espesor: 280 μm .	Oxidadas ambas caras. Espesor del óxido: 1 μm . Pulida doble cara.	Orientación: (100) Resistividad: 1-3 Ω/cm Proceso: Czochralski. [14] Módulo de Young: 129 GPa. Densidad: 2.33 gr/cm^3 Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.27$
Tipo <i>p</i>	Diámetro: 5 cm. Espesor: 280 μm .	Oxidadas ambas caras. Espesor del óxido: 1 μm . Pulida una cara.	Orientación: (100) Proceso: Czochralski.

Capítulo 2

2. Diseño del sensor capacitivo: Modelado y simulación.

Como se ha visto anteriormente, los sensores de presión generalmente están formados por un diafragma, ya sea circular o cuadrado, el cual es el elemento sensitivo principal o que tiene en su superficie los elementos que convertirán la presión aplicada en una variable eléctrica. Lo más común de encontrar son elementos piezorresistivos que se deforman a la par del diafragma y que están distribuidos formando un puente de Wheatstone, donde la variación de resistencia de los elementos genera un cambio en el voltaje, [2], [17]. La facilidad de construcción y empaquetado hace que estos sensores sean más utilizados para mediciones de presión.

Por otro lado los sensores capacitivos tienen un funcionamiento menos complejo y no requieren de algún arreglo especial dentro del mismo dispositivo (puente de Wheatstone) para poder realizar mediciones de presión. La presión aplicada genera un desplazamiento lo cual provoca que las placas se acerquen o alejen variando la capacitancia. Estos sensores presentan una mayor sensibilidad que los sensores piezorresistivos, pero es más complejo su empaquetado y sellado a vacío de la cavidad capacitiva, lo que provoca que su fabricación sea más compleja que la de los sensores piezorresistivos, [18], [19], [20].

Este trabajo se centra en el diseño, simulación y la fabricación del elemento sensitivo, por lo que la etapa de medición consiste solamente en la medición de capacitancia generada por el elemento sensitivo y una placa fija de material conductor.

2.1 Descripción del sensor.

La estructura está conformada por un diafragma cuadrado con una masa (denominado Boss) en el centro del diafragma, encontrándose fijo al bastidor en un solo bloque de silicio. Esto implica que el elemento sensitivo y principal de este sensor sea el Boss, y que el estudio de desplazamiento generado por una presión sea enfocado al desplazamiento del Boss. Para mejorar la manipulación de cada dispositivo y para facilitar el maquinado la masa en el diafragma con suficiente superficie para los contactos, el tamaño del bastidor debe de ser del orden de milímetros.

El área efectiva del capacitor está definida por el área del Boss; como se sabe en este tipo de sensores la capacitancia es del orden de unidades de pico-faradios por lo cual se debe fabricar una masa con la suficiente área para obtener valores de capacitancia del orden de decenas de pico-faradios.

La variable fundamental del modelo que se propone es la distancia entre las placas, mediante la variación de ésta se podrá medir la presión que se aplique al diafragma y a la masa. La distancia estará definida por el material aislante que exista entre el bastidor del dispositivo y una placa fija de material conductor, para esto el material aislante utilizado será el óxido de silicio presente en las muestras del orden de $1\mu m$ de espesor.

Finalmente se proponen dos tipos de capacitor formados a partir de la misma estructura:

- a) Diafragma-Boss
- b) Estructura fabricada y segundo contacto

La primera arquitectura (diafragma-Boss) está conformada por la estructura maquinada y una película de oro depositada en vidrio (Figura C2.2 (a)); en esta arquitectura la distancia entre las placas depende solamente del óxido de silicio presente en el bastidor el cual es menor a la distancia obtenida en el segundo modelo de capacitor. La segunda arquitectura se obtiene a partir de la estructura fabricada y un segundo contacto, ambos obtenidos de substratos de silicio (Figura C2.2 (b)). En este caso la distancia depende de los óxidos presentes en cada substrato de silicio utilizados para la fabricación de la estructura y del segundo contacto, por lo que la capacitancia esperada será menor al de la primera arquitectura.

Se puede ver que la estructura principal está fabricada en un mismo substrato de silicio tipo n, por lo que para un cuarto de oblea de $5cm$ de diámetro podemos acomodar 16 elementos, cada uno delimitado y unido por las calles. De esta forma podemos asegurar la obtención al menos 9 estructuras en una sola muestra (ver elaboración de mascarillas).

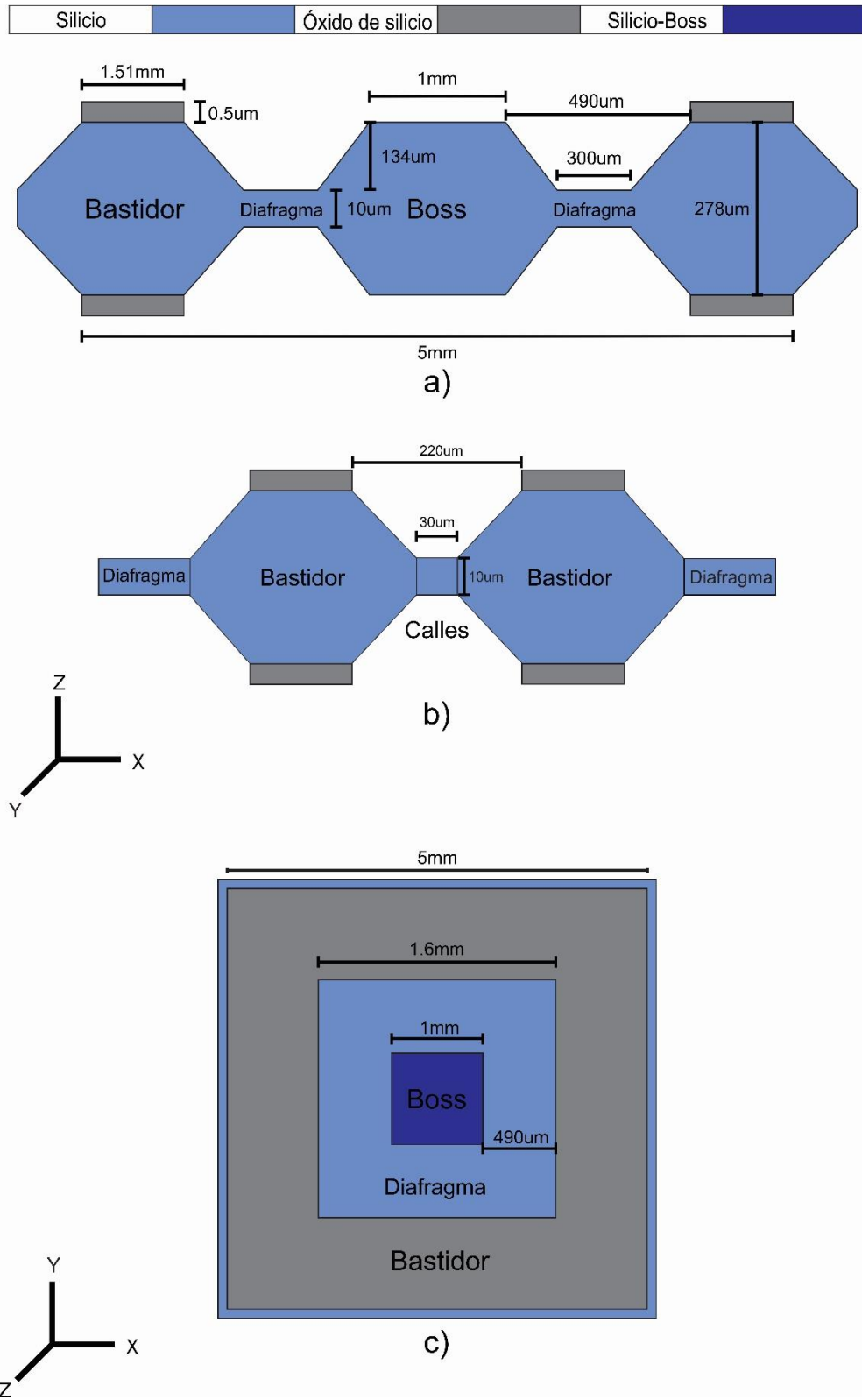
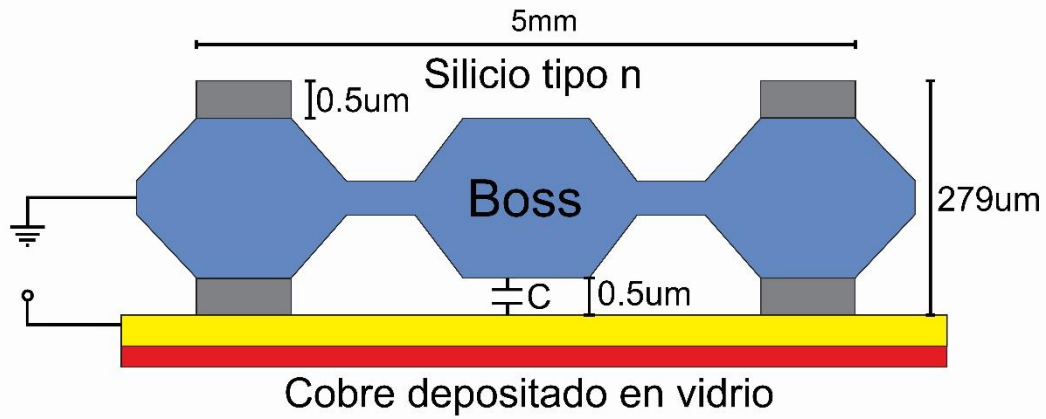


Figura C2.1 Estructura propuesta. a) Vista transversal de la estructura; b) vista transversal de la unión de las estructuras (calles); c) vista superior de la estructura propuesta.

Silicio tipo n	Silicio tipo p	Óxido de silicio
Cobre	Vidrio	



a)

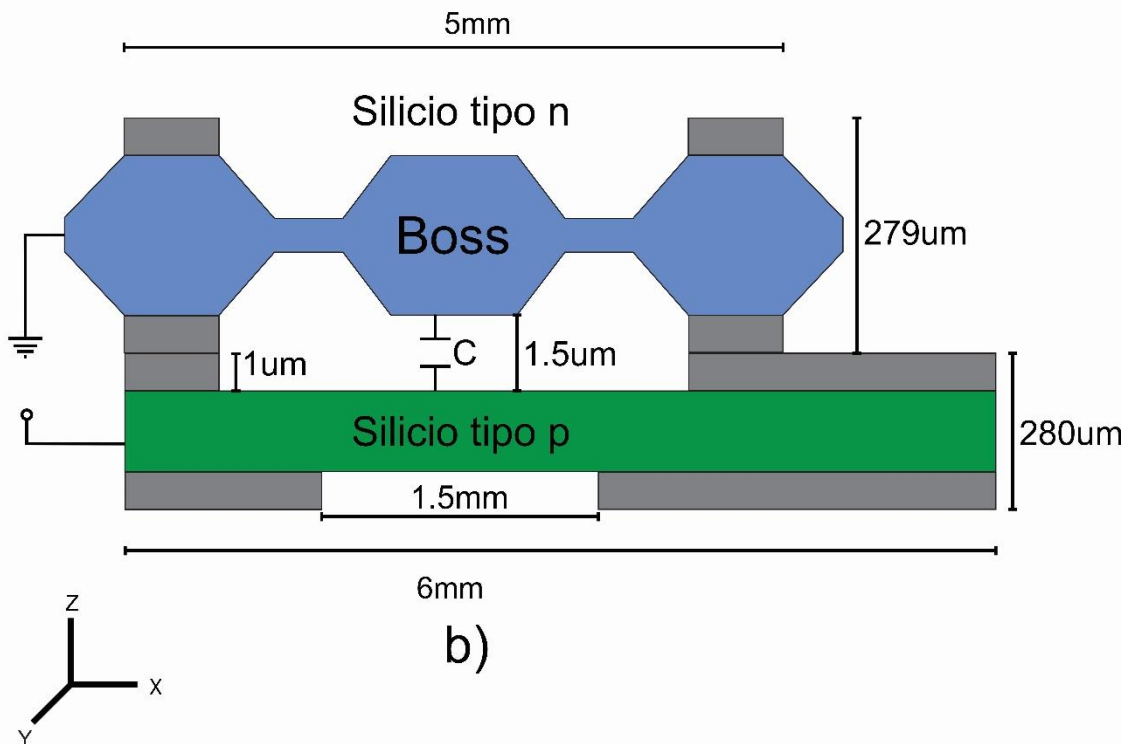


Figura C2.2 Modelos de capacitor generados a partir de una misma estructura, a) este modelo genera un valor más alto de capacitancia; b) capacitor con dos placas de silicio (tipo n y p).

Tabla T2.1 Arquitecturas propuestas.

Arquitectura	Descripción	Características	Medidas importantes
Estructura y película de oro	Capacitor conformado por una película de oro y el Boss. El área de las placas se determina por el área del Boss.	La distancia entre placas la determina el óxido de silicio de la estructura. A la película de oro se le aplica un voltaje mientras que la estructura es aterrizada. El dieléctrico utilizado es aire.	Estructura: $5 \times 5 \text{ mm}$ Área de las placas: 1 mm^2 Distancia de las placas: $0.5 \mu\text{m}$
Estructura y contacto de silicio	Capacitor conformado por un contacto de silicio tipo P y el Boss. El área de las placas se determina por el área del Boss.	La distancia entre placas la determina el óxido de silicio de la estructura y el contacto. La polarización del capacitor se obtiene aterrizando la estructura y aplicando un voltaje al contacto de silicio. El dieléctrico utilizado es aire.	Estructura: $5 \times 5 \text{ mm}$ Contacto: $5 \times 6 \text{ mm}$ Área de las placas: 1 mm^2 Distancia de las placas: $1.5 \mu\text{m}$ Ventanas en contacto de silicio: $1.6 \times 1.6 \text{ mm}$ cara interna. $1.5 \times 1.5 \text{ mm}$ cara externa.

2.2 Análisis matemático y simulación de la estructura.

Debido a que, para el sensor propuesto, la variación de capacitancia depende del desplazamiento de las placas, hacer uso de un modelo matemático que nos describa el desplazamiento de la estructura sensitiva en función de una fuerza o presión nos permite entender el comportamiento de la estructura.

En la literatura encontramos modelos matemáticos que describen el desplazamiento de diafragmas cuadrados y de vigas voladizas en diferentes circunstancias, descomponiendo la estructura propuesta en modelos más simples como estos podemos simplificar el análisis de desplazamiento. Para esto realizamos una aproximación mediante dos modelos:

- 1) Diafragma cuadrado de $1600 \times 1600 \times 10 \mu\text{m}$.
- 2) 4 vigas voladizas de $300 \times 1000 \times 10 \mu\text{m}$ en cuyo extremo sostienen una masa de $1000 \times 1000 \times 278 \mu\text{m}$.

Al ser la primera estructura un diafragma, éste sufre una deformación por la aplicación de una presión; debido a esto se analiza el desplazamiento en el centro del diafragma. La segunda estructura considera el efecto de la masa en cada una de las vigas, por lo que la fuerza ejercida por la masa se ve repartida en las 4 vigas. Al ser las vigas iguales, este modelo se reduce al análisis de una sola viga voladiza en cuyo extremo se aplica una fuerza consistente en el peso de la masa y una fuerza

(representación de la presión en todo el Boss), ambas fuerzas equivalen a una cuarta parte de los valores reales aplicados.

Empleando el módulo TEM del software IntelliSuite (© 2012 IntelliSense Software Corporation) realizamos la simulación para desplazamiento y capacitancia. Comparando los resultados de la simulación con los del análisis matemático podremos darnos una idea del funcionamiento real del sensor. Las simulaciones de desplazamiento se realizan aplicando el valor más grande del rango de presiones propuesto (0-300 mmHg), con este valor podemos obtener la capacitancia máxima (cuando se aplican 40Kpa) y mínima (cuando no se aplica presión) esperada para el dispositivo.

2.2.1 Primera aproximación.

Para diafragmas cuadrados maquinados en un sustrato de silicio, se puede relacionar el desplazamiento con la presión aplicada, [20].

$$\Delta P = \frac{Eh^4}{(1-v^2)a^4} \left[4.2 \frac{d}{h} + 1.58 \frac{d^3}{h^4} \right] \quad (1)$$

Donde:

- E es el módulo de Young del silicio.
- v es el coeficiente de Poisson del silicio.
- h es el espesor del diafragma.
- a es el la mitad de la longitud de un lado del diafragma.
- d es el desplazamiento del diafragma.
- ΔP representa la presión aplicada al diafragma.

De la ecuación (1) dentro de los corchetes, el primer término considera los desplazamientos menores al espesor del diafragma ($d < h$), mientras que el segundo es para desplazamientos mayores ($d > h$). Al ser la distancia entre placas menor a 10 micras, el desplazamiento del Boss es menor a 10 micras y el segundo término puede desprejarse. Poniendo el desplazamiento en términos de la presión aplicada queda:

$$d = \frac{\Delta P a^4 (1 - v^2)}{4.2 E h^3} \quad (2)$$

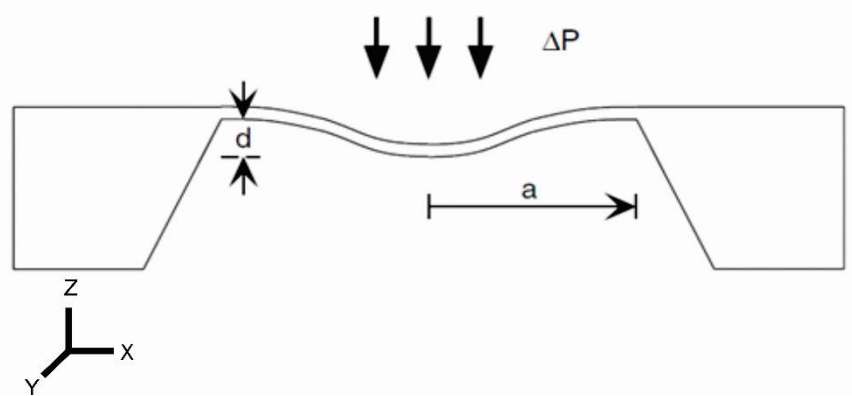


Figura C2.3 Vista transversal de un diafragma cuadrado, se le aplica una presión para obtener un desplazamiento que varía conforme nos acercamos de los bordes al centro.

Al aplicar el valor máximo considerado (40kPa) obtendremos el desplazamiento máximo en el centro del diafragma.

$$d = 28.04 \times 10^{-6} m \quad (3)$$

El modelo en 3D empleado en la simulación es una placa cuadrada con sus lados fijos, la presión es aplicada en su cara inferior. Como se observa en la Figura el desplazamiento máximo obtenido es de $25.05 \mu m$, una diferencia de $3 \mu m$ con respecto al calculado mediante el modelo matemático.

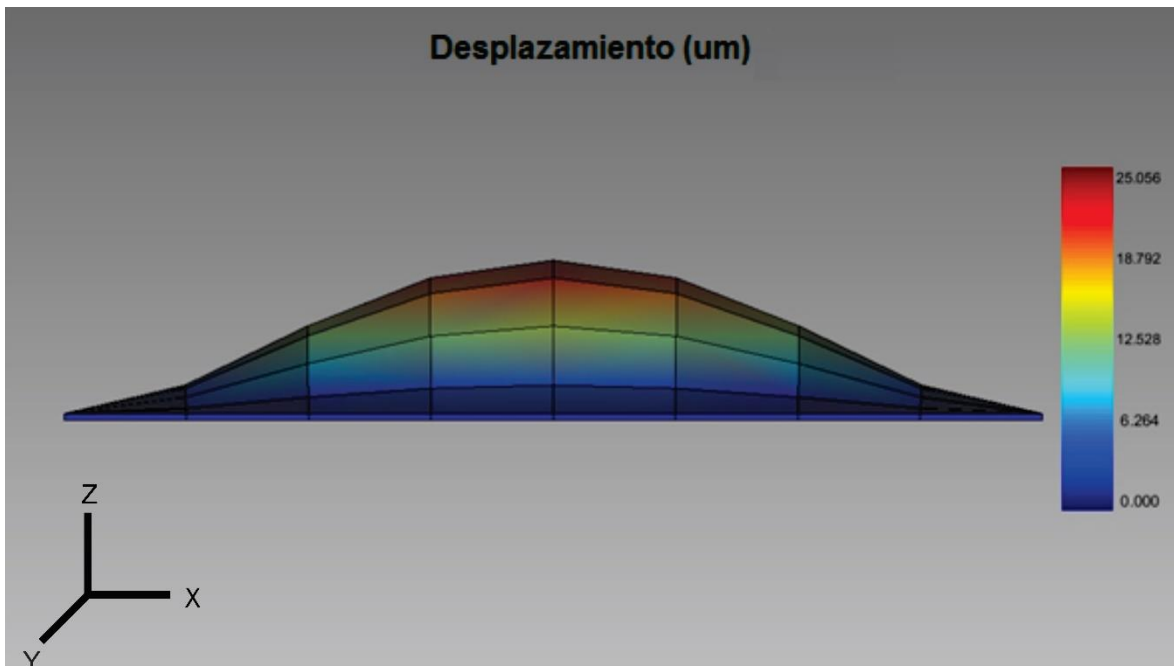


Figura C2.4 Simulación de desplazamiento de un diafragma, fijo en un substrato de silicio, de 1.6 mm de lado y 10 μm de espesor al cual se le aplica una presión de 40 kPa.

Se puede observar que el desplazamiento máximo en un diafragma es en el centro del mismo, además de sufrir una deformación.

2.2.2 Segunda aproximación.

De acuerdo a las ecuaciones de Roark, podemos calcular el desplazamiento de una viga voladiza al aplicarle una fuerza en un extremo, [21], [22].

$$d = \frac{L^3}{3EI} F \quad (4)$$

Donde:

- d es el desplazamiento de la viga en el extremo libre.
- L es la longitud de la viga.
- E es el módulo de Young del silicio.
- F es la fuerza aplicada, perpendicular a la longitud de la viga.
- I es el momento de inercial dado por:

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (5)$$

- t es el espesor de la viga.
- w es el ancho de la viga.

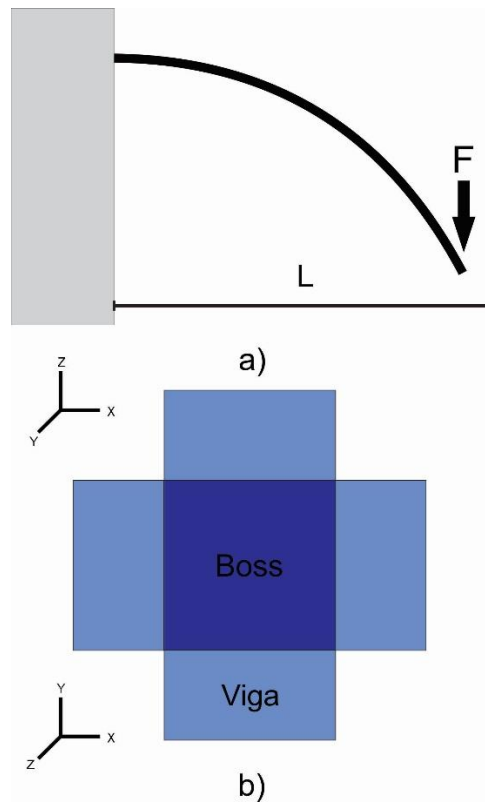


Figura C2.5 Los soportes del Boss (b) se consideran como vigas voladizas (a) a las cuales se les aplica una fuerza equivalente al peso del Boss y de la presión aplicada al mismo.

Considerando un cuarto de la presión aplicada al Boss obtenemos el desplazamiento máximo en el extremo de una viga voladiza.

$$d = 8.37 \times 10^{-6} m \quad (6)$$

En la simulación se utiliza el modelo 4 vigas voladizas fijas en un extremo y en el otro sostienen al Boss. (Figura C2.5-b). Se aplica 40kPa de presión en la cara inferior del Boss lo que genera un desplazamiento máximo de $7.16 \mu m$, una diferencia de $1.21 \mu m$ con respecto al calculado mediante el modelo matemático.

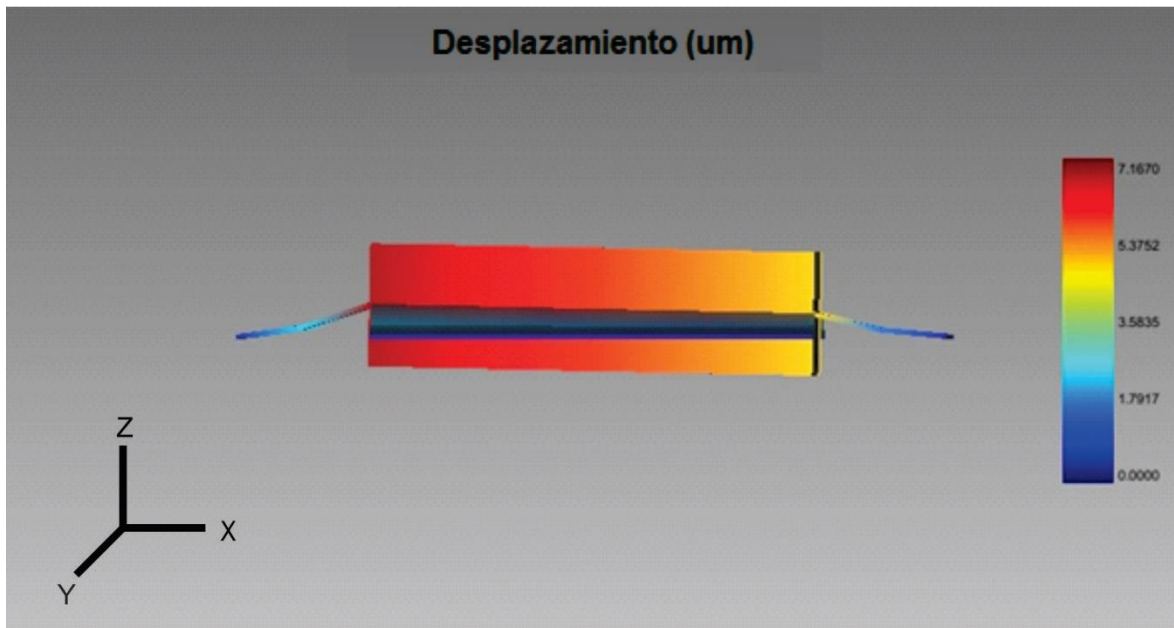


Figura C2.6 Desplazamiento del Boss sujeta por 4 vigas voladizas causado por una presión de 40kPa.

A diferencia de la primera aproximación, esta estructura no presenta deformación en el Boss y el desplazamiento es menor al del diafragma.

2.2.3 Análisis y simulación de la estructura fabricada.

Las aproximaciones permiten observar el desplazamiento de estructuras más simples y nos dan una idea del comportamiento esperado del dispositivo fabricado. Ahora es necesario analizar la estructura diseñada para obtener un comportamiento más cercano a la realidad.

Consideremos la segunda aproximación como un resorte con una masa a la que se le aplica una fuerza, esto convierte al sistema de vigas voladizas en 4 resortes que sostienen una misma masa; debido a que este sistema desprecia el material presente en las esquinas del bastidor (Figura C2.7) los desplazamientos son mayores a la distancia entre placas del dispositivo. Por otro lado, el elemento

sensitivo del sensor puede verse como una estructura resorte-masa-resorte parecida a la segunda aproximación, en donde el diafragma está representado por un resorte al cual se le asocia una constante de restitución. Sin embargo, el desplazamiento del Boss se ve disminuido por la presencia de material en las esquinas (diafragma) en comparación a la segunda aproximación.

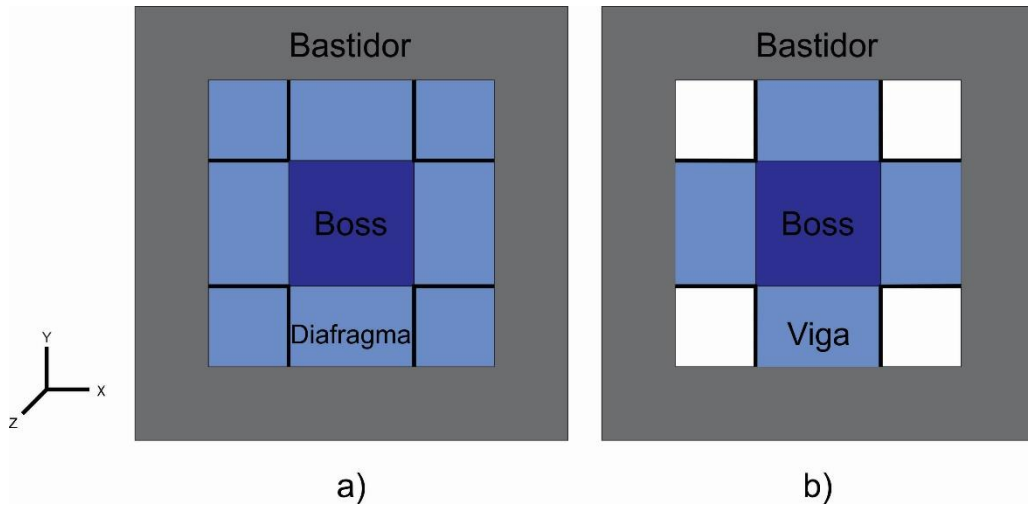


Figura C2.7 El modelo real (a) considera las esquinas despreciadas en la segunda aproximación (b), lo que provoca una disminución del desplazamiento del Boss.

De acuerdo a la ley de Hooke [23], tenemos:

$$F = -ky \quad (7)$$

Donde:

- y es el desplazamiento de la masa.
- k es la constante de restitución del resorte.
- F es la fuerza aplicada a la masa.

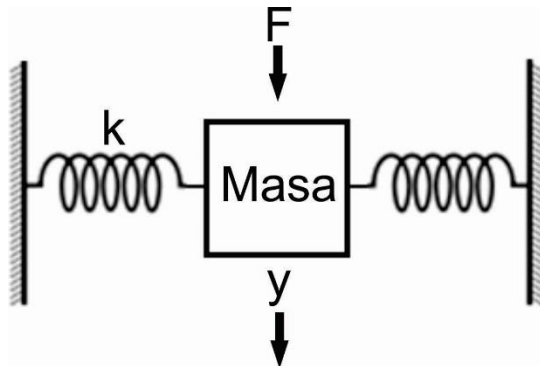


Figura C2.8 La estructura maquinada puede verse como una estructura Resorte-Masa-Resorte.

Mediante la ecuación (7) podemos determinar la constante de restitución del diafragma. Determinar esta constante significa obtener un modelo matemático que describa el desplazamiento del dispositivo fabricado (ley de Hooke).

$$k = \frac{F}{y} \quad (8)$$

Al ser el sensor un capacitor de placas paralelas, si se aplica un peso (fuerza) conocido sobre el Boss podemos medir la variación de capacitancia, ecuación (9), y así determinar el desplazamiento. La constante k se obtiene realizando pruebas sobre la estructura micromaquinada.

La simulación nos muestra el desplazamiento esperado de la masa ante una presión máxima de 40kPa, se puede comprobar que el desplazamiento es de $1.03 \mu\text{m}$ lo que demuestra que la segunda arquitectura propuesta es la mejor opción para elaborar el sensor capacitivo.

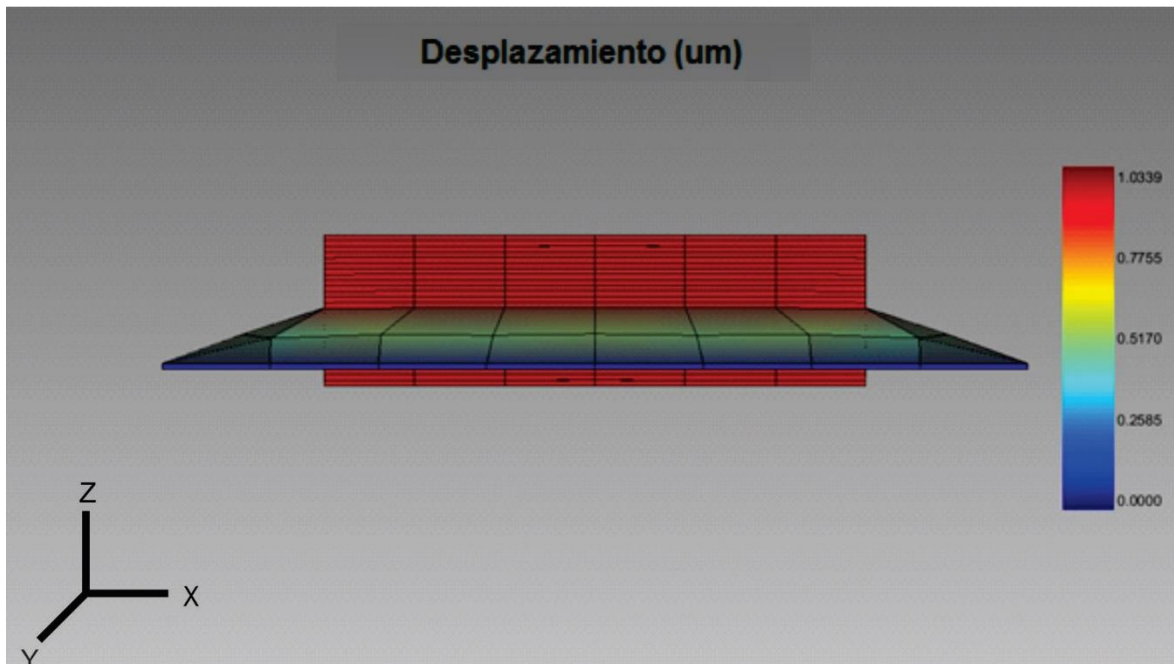


Figura C2.9 El diafragma está sujeto en los extremos al bastidor. El desplazamiento de la estructura ante el valor máximo de presión está dentro de los valores permitidos para el sensor.

La estructura propuesta tiene un desplazamiento menor a las dos aproximaciones antes analizadas y, a diferencia de la primera aproximación, el Boss no presenta deformación alguna.

2.2.4 Análisis de Capacitancia respecto a desplazamiento.

Finalmente, se realiza el análisis de capacitancia en respuesta a ese desplazamiento del Boss. La ecuación siguiente permite calcular la capacitancia de placas paralelas, [4], [5].

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{A}{d} \quad (9)$$

Dónde:

- C es la capacitancia.
- ε_0 es la permisividad del vacío.
- ε es la constante dieléctrica del dieléctrico entre las placas, para este trabajo se utiliza aire.
- A es el área de las placas.
- d es la distancia entre las placas.

De acuerdo a la simulación del dispositivo, el Boss realiza un desplazamiento homogéneo en todo el Boss y sin presentar deformación como el diafragma; esto permite utilizar la ecuación (9) para describir la variación de capacitancia de la estructura. La distancia entre las placas se varía de $1.5 \mu m$ a $0.2 \mu m$ para la simulación y el cálculo matemático. La simulación realiza el análisis de capacitancia de dos placas paralelas como representación del Boss y un contacto, una placa (el Boss) se desplaza de acuerdo a los valores obtenidos en el análisis de desplazamiento.

Se puede observar una concordancia entre los cálculos matemáticos y la simulación (Figura C2.10 y C2.11), permitiéndonos conocer la capacitancia esperada del dispositivo fabricado. Mediante el desplazamiento podemos obtener la relación de presión aplicada y capacitancia generada, para las presiones de 0 y 40 kPa se obtienen los valores de capacitancia máximos y mínimos que se esperan para la segunda arquitectura donde la distancia entre las placas es mayor; para la primera arquitectura al tener una menor distancia entre placas se establece un nuevo valor máximo de presión aplicada para evitar realizar el contacto directo entre las dos placas del capacitor.

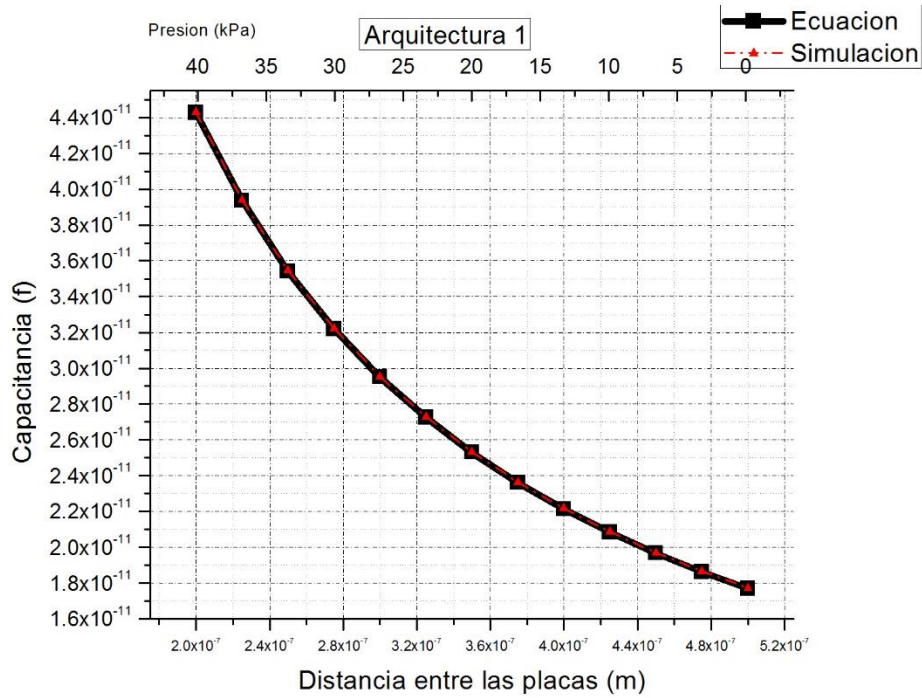


Figura C2.10 Capacitancia vs distancia entre las placas de la primera arquitectura. La distancia inicial de las placas es de 0.5um.

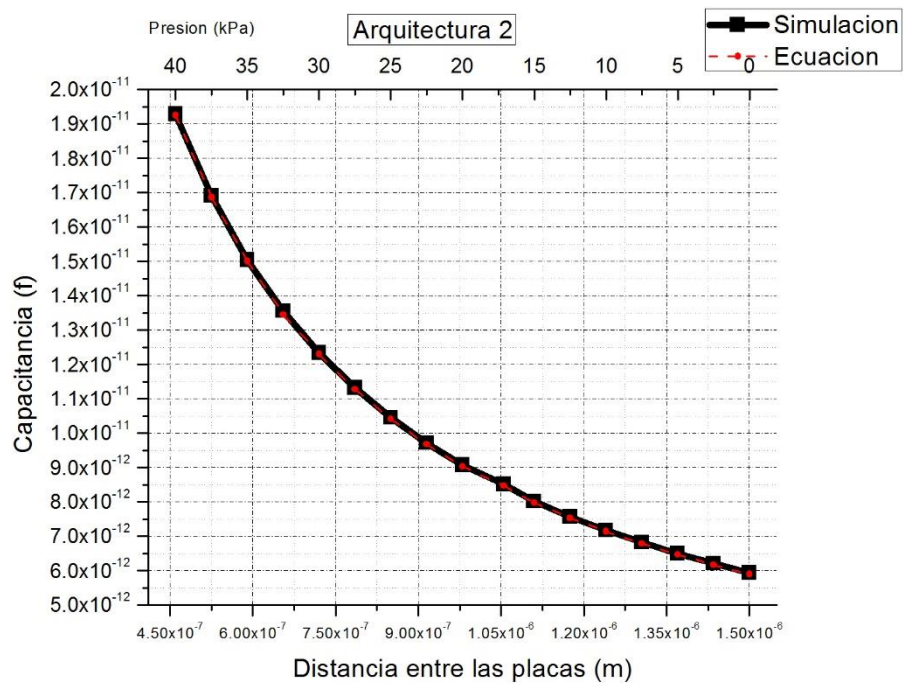


Figura C2.11 Capacitancia vs distancia entre las placas de la segunda arquitectura. La distancia inicial de las placas es de 1.5um.

Por último, para obtener la constante de restitución del diafragma empleamos la ecuación (10) para determinar el desplazamiento sufrido por la masa ante un peso conocido (F_c). Como al aplicar un peso la masa se acerca a la segunda placa, la capacitancia varía y se puede calcular el desplazamiento del Boss.

$$d_1 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{A}{C} \quad (10)$$

El desplazamiento sufrido por la masa se calcula sacando la diferencia entre la distancia inicial y la distancia final de las placas del capacitor. De esta forma la ecuación (8) queda de la siguiente manera:

$$k = \frac{F_c}{(d_0 - d_1)} \quad (11)$$

Mediante el cálculo de la constante de restitución del diafragma podemos obtener el comportamiento de desplazamiento del Boss ante cualquier presión aplicada.

Capítulo 3

3. Fabricación del sensor aplicando la técnica de Micromaquinado.

La industria de los circuitos integrados tuvo un papel importante en el desarrollo y crecimiento de las tecnologías de micromaquinado, muchas herramientas usadas en el diseño y manufacturación de productos MEMS son tomadas de esta industria. Por lo mismo determinados valores y características en las etapas del Micromaquinado son reproducciones de las etapas de la microelectrónica. El micromaquinado de volumen, es una serie de procesos que permite obtener estructuras y elementos tridimensionales, del orden de los micrómetros, a partir de un solo bloque de material (substrato) para aprovechar sus características y propiedades como medio para el estudio de fenómenos físicos, [16] [24].

Al atacar selectivamente áreas del substrato (comúnmente es silicio cristalino) mediante procesos de grabado como son vigas voladizas, agujeros, canales, membranas o diafragmas, aprovechando las orientaciones de los planos de las estructuras cristalinas del silicio mediante ataques con Hidróxido de Potasio (*KOH*).

Podemos dividir la técnica de Micromaquinado en cinco partes principales:

- 1) El diseño de las mascarillas.
- 2) La limpieza de las muestras.
- 3) El fotolitograbado.
- 4) La apertura de ventanas en SiO_2 .
- 5) El maquinado de la estructura.

El primero es el diseño de los patrones que se usaran para elaborar las estructuras, el segundo es el proceso por el cual se eliminan los contaminantes que puedan estar presentes en las muestras, el tercero es el proceso por el cual se graban los patrones de la mascarilla en la superficie del sustrato de silicio oxidado, el cuarto es la eliminación del óxido de silicio de acuerdo a los patrones obtenidos en la fotolitografía y el último es el ataque químico anisotrópico al silicio para obtener las estructuras deseadas. Los pasos para la fabricación del dispositivo son los siguientes:

1. Mascarillas

- 1.1. Ecuaciones para la definición de las ventanas.
- 1.2. Diseño de mascarillas.

- 1.3. Impresión de mascarillas
- 1.4. Alineación de mascarillas
- 2. Limpieza Piraña**
 - 2.1. Elaboración de Piraña
 - 2.2. Limpieza con Piraña
 - 2.3. Sumergir en HF
 - 2.4. Sumergir en acetona y alcohol
 - 2.5. Secado
- 3. Fotolitogrado**
 - 3.1. Depósito de resina fotosensible
 - 3.2. Precocido o Soft Baking
 - 3.3. Exposición
 - 3.4. Revelado
 - 3.5. Recocido o Hard Baking
- 4. Apertura de ventanas en SiO_2**
 - 4.1. Elaboración de la solución
 - 4.2. Ataque y monitoreo
 - 4.3. Remoción de la resina
 - 4.4. Secado
- 5. Ataque con KOH**
 - 5.1. Razón de ataque - Si y SiO_2
 - 5.2. Cálculo de tiempos de ataque
 - 5.3. Maquinado

Una descripción más detallada de los procesos empleados en la técnica de Micromaquinado se puede encontrar en el Anexo2.

3.1 Mascarillas.

Las mascarillas son los patrones que se utilizan para transferir los dibujos (patrones) mediante el fotolitogrado a la superficie de la oblea para así abrir ventanas en el óxido de silicio (SiO_2) y dejar al descubierto las zonas que van a ser atacadas.

3.1.1 Ecuaciones para la definición de las ventanas.

Aprovechando las características del silicio cristalino, podemos hacer uso de ecuaciones preestablecidas para la fabricación de estructuras en un solo bloque como diafragmas. Debido a que la estructura a fabricar es un diafragma con un Boss central, la ecuación empleada para el diseño de las mascarillas es la siguiente:
[25]

$$L = l + (T - h)\sqrt{2} \quad (12)$$

Dónde:

- l es el ancho del diafragma.
- T es el espesor de la oblea de silicio.
- h es el espesor del diafragma.
- L es el ancho de la ventana.

Para este trabajo, las dimensiones conocidas de las muestras y de las dimensiones de la estructura son (de acuerdo a la Figura C2.1):

- $T = 278\mu m$ (no se considera el espesor del óxido de la superficie); $\frac{T}{2} = 139\mu m$.
- Espesor del diafragma y de las calles $h = 10\mu m$, $\frac{h}{2} = 5\mu m$.
- Longitud de diafragma $l = 300\mu m$.
- Longitud de calles $l = 30\mu m$.
- Espesor del óxido de la oblea $1\mu m$.
- Espesor de la oblea $280\mu m$
- Diámetro de la oblea $5cm$
- Muestras: $2.5cm \times 2.5cm \times 280\mu m$

El tamaño de las ventanas para poder fabricar el diafragma y el Boss es de:

$$L = 489.5\mu m \cong 490\mu m \quad (13)$$

El tamaño de las ventanas para realizar el avance de las calles es de:

$$L = 219.5\mu m \cong 220\mu m \quad (14)$$

3.1.2 Diseño de mascarillas.

De acuerdo a las arquitecturas planteadas, se calculan las dimensiones para cada una de las mascarillas necesarias. Las mascarillas generadas en espejo se utilizan para realizar ataques en las dos caras de la muestra. Con el fin de aprovechar al máximo las muestras, las mascarillas empleadas para la definición de las calles y para las estructuras se diseñan colocando un total de 16 patrones. Las marcas de alineación permiten empalmar las mascarillas y acomodar la muestra durante el proceso de fotolitografía.

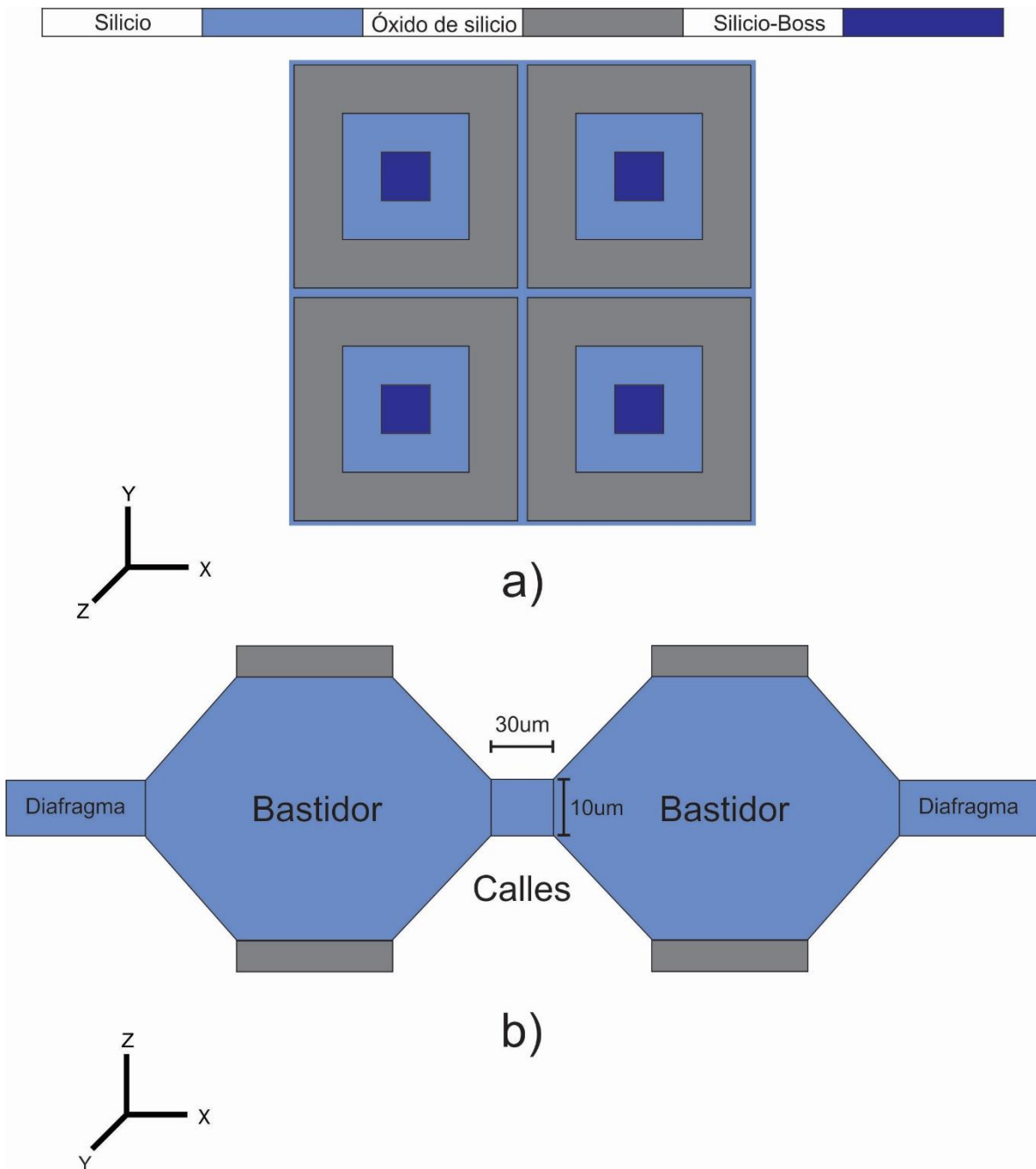


Figura C3.1 a) 4 estructuras unidas por las calles (color azul claro), en una muestra se acomodan la mayor cantidad posible de estructuras; b) dimensiones de las calles deseadas.

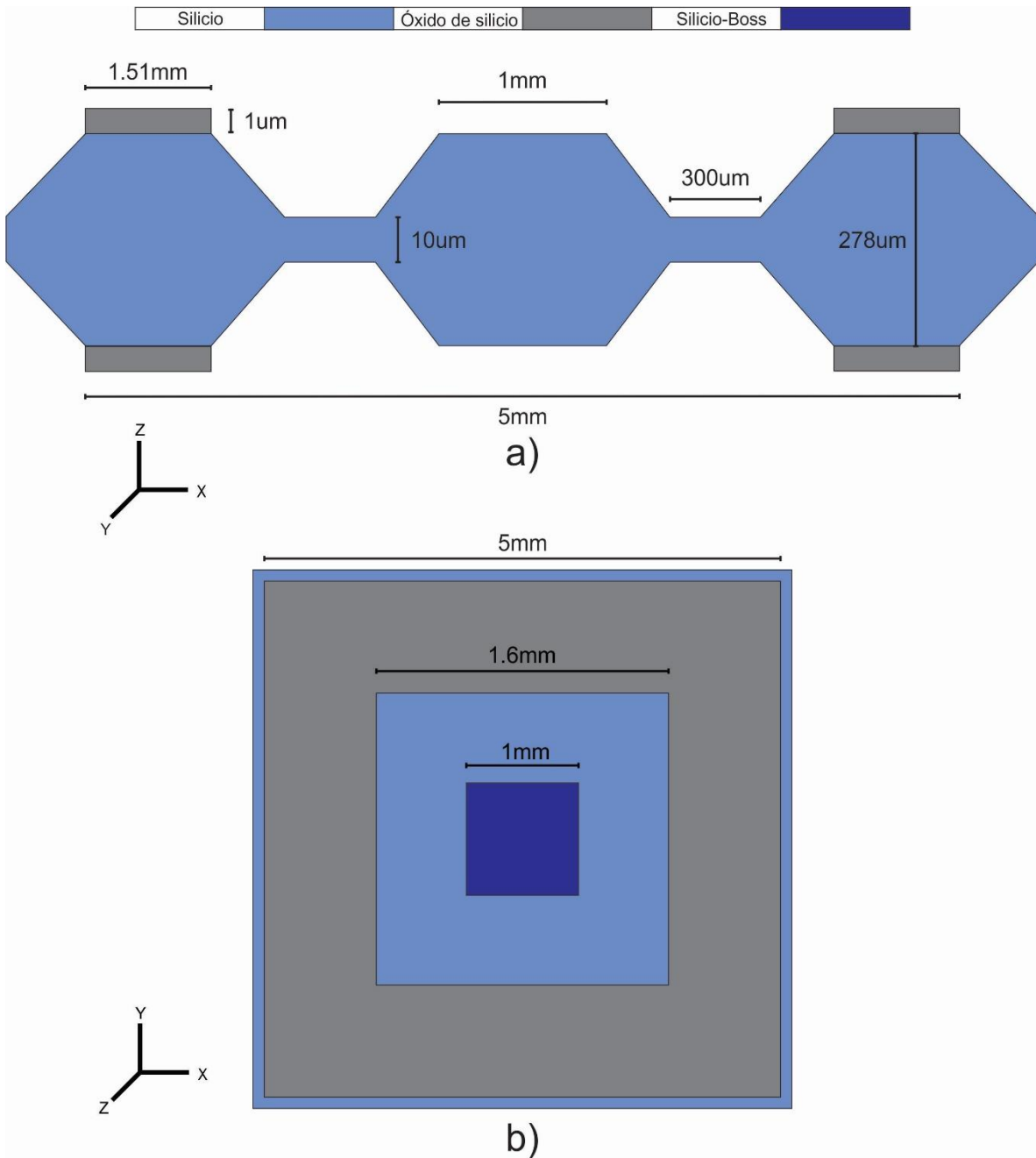


Figura C3.2 Dimensiones del elemento sensitivo: a) Vista transversal; b) vista superior, los dos tonos de azul representan silicio, uno corresponde al diafragma y el otro a la masa móvil.

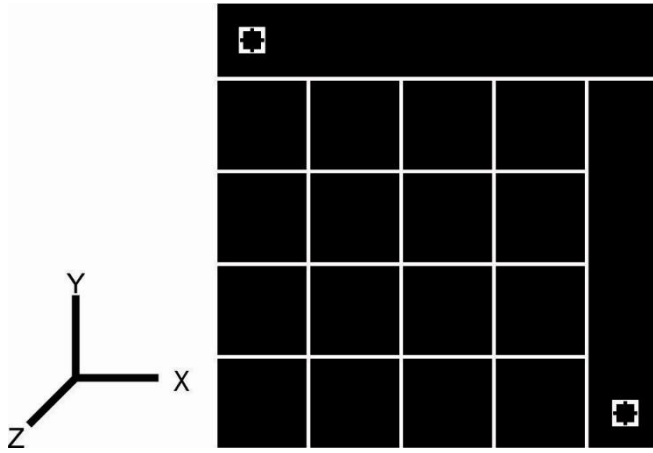


Figura C3.3 Mascarilla empleada para el maquinado de las calles.

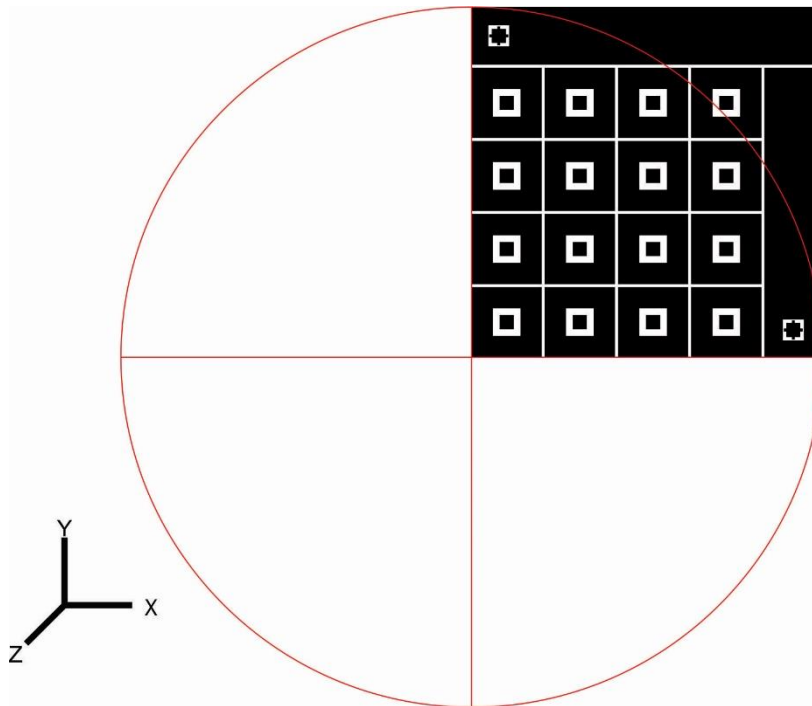


Figura C3.4 Mascarilla para maquinado de la estructura, la mascarilla abarca un cuarto de oblea de silicio de 5cm de diámetro.

La fabricación de los contactos para la segunda arquitectura solamente requiere de la apertura de ventanas en muestras de silicio tipo *P*, las calles delimitan cada uno de los contactos en la muestra, en cada contacto se abren canales para evitar que el aire en esa área quede atrapado y genere una resistencia al desplazamiento del Boss.

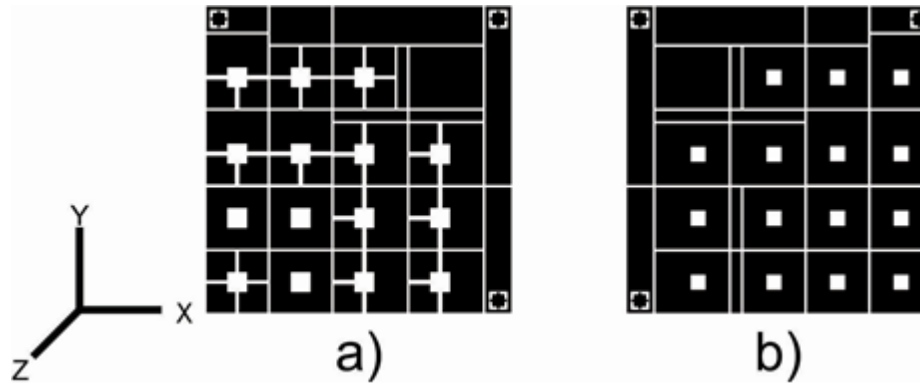


Figura C3.5 a) mascarilla para contacto que mira hacia el Boss; b) mascarilla para cara exterior.

3.1.3 Impresión de las mascarillas.

Es importante que la impresión de las mascarillas cumpla con las siguientes características:

- El material de impresión debe ser transparente.
- La tinta utilizada debe tener buena adherencia al material.
- La impresión no puede tener aglomeraciones de tinta, debe ser uniforme en todo el patrón.
- La impresión no debe presentar salpicaduras ni huecos no contemplados en los patrones.
- Los patrones deben de quedar bien definidos, cada borde del dibujo no debe presentar picos, dientes, ondulaciones o cualquier otro patrón que no sea establecido en el diseño de la mascarilla.

Las mascarillas pueden ser diseñadas utilizando cualquier software de dibujo que genere imágenes de por lo menos 1200 puntos por pulgada (ppp). La resolución de la imagen generada es importante para obtener una buena impresión

Se puede realizar la impresión de las mascarillas mediante dos formas:

- Utilizando una impresora láser de 1200x1200 ppp o mayor.
- Mediante la técnica de elaboración de negativos y positivos (fotomecánica).

Para obtener mejores resultados en el proceso de fotolitografía, las mascarillas se imprimen mediante la técnica de fotomecánica.

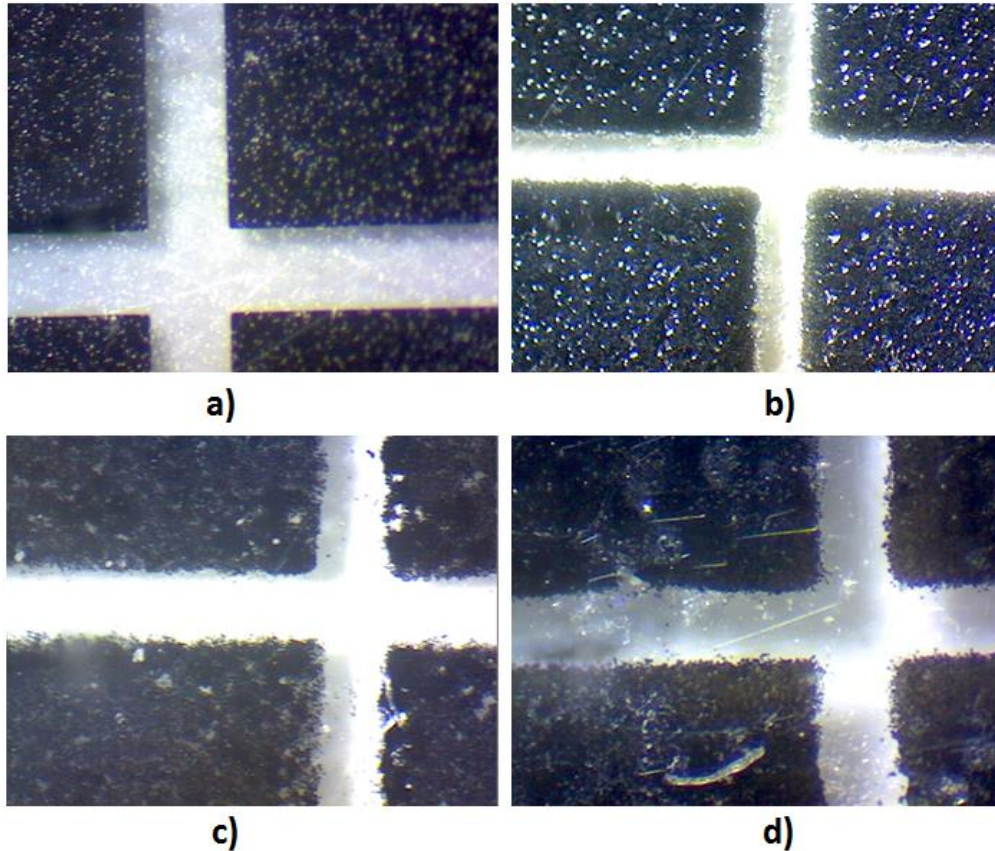


Figura C3.6 a) Mascarilla impresa mediante fotomecánica, por este método se logra mayor calidad en las mascarillas; b) Mascarilla obtenida con impresora láser, la definición de los bordes no es suficientemente buena. Las mascarillas c) y d) no cumplen con las características necesarias para utilizarlas en el proceso de fotolitografía, los bordes no están bien definidos además de tener salpicaduras y zonas no cubiertas por la tinta.

3.1.4 Alineación de mascarillas.

Las mascarillas se montan y sujetan en una estructura que permite realizar el proceso de fotolitografía; con el propósito de realizar el ataque por ambos lados de la muestra, las mascarillas deben de alinearse antes de ser fijadas en la estructura. Las mascarillas se contraponen alineándolas con ayuda de un microscopio y fijándolas para, posteriormente, colocar la muestra entre ellas.

Mediante un marco de aluminio se fija un vidrio con una de las mascarillas (A), la segunda mascarilla (B) se sujeta a un cuadro de vidrio, la muestra se coloca entre el marco y el cuadro de vidrio (entre A y B).

Etapas de la alineación de mascarillas:

1. Se fija la mascarilla A en el bastidor (estructura para fijar y alinear mascarillas), cuidando que la tinta quede hacia arriba.

2. Mediante un microscopio alineamos la mascarilla B, con la tinta mirando hacia A. Para esto usamos las marcas de alineación.
3. Colocamos el cuadro de vidrio encima de la mascarilla B evitando deslinearla. Usamos silicón líquido para pegar la mascarilla B al cuadro de vidrio.
4. Comprobamos la alineación colocando el cuadro de vidrio sobre el marco. El cuadro se sujeta con imanes, los cuales empujan al cuadro hacia los postes del bastidor.
5. Utilizando trozo del material de impresión, (en este caso se emplea fotolito), hacemos un tope en el borde de la mascarilla para acomodar la muestra en la mascarilla.

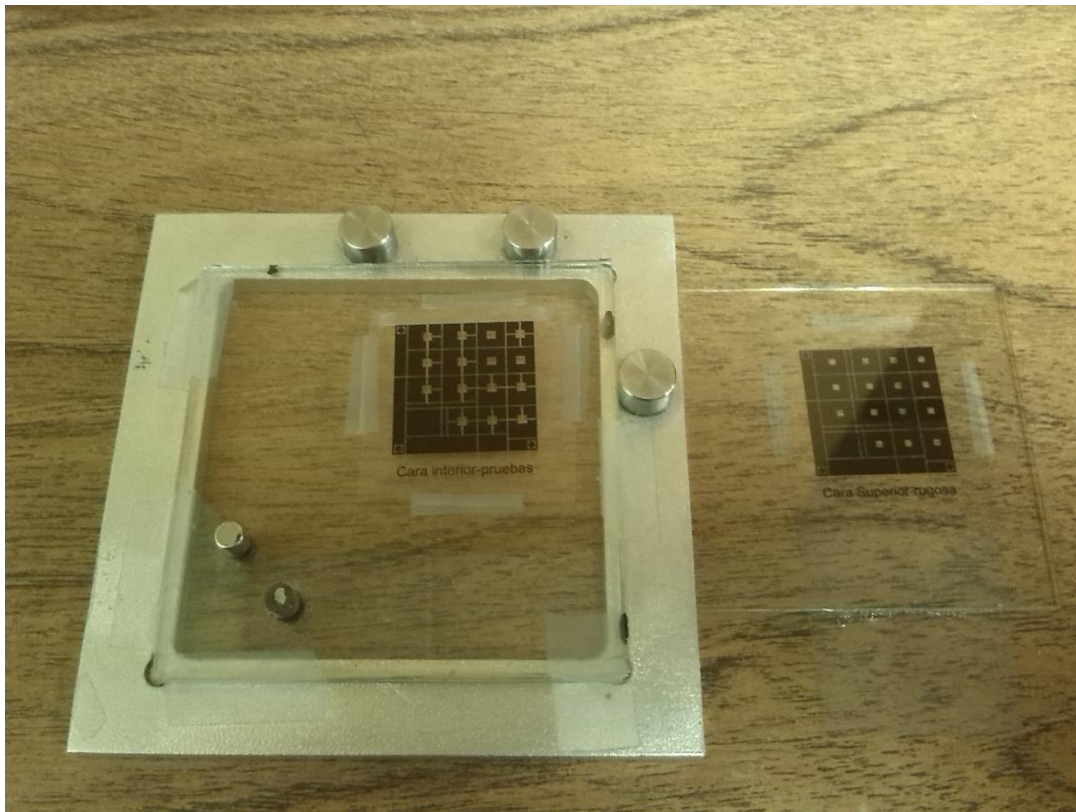


Figura C3.7 Estructura para sujetar la muestra y realizar el fotolitogrado.

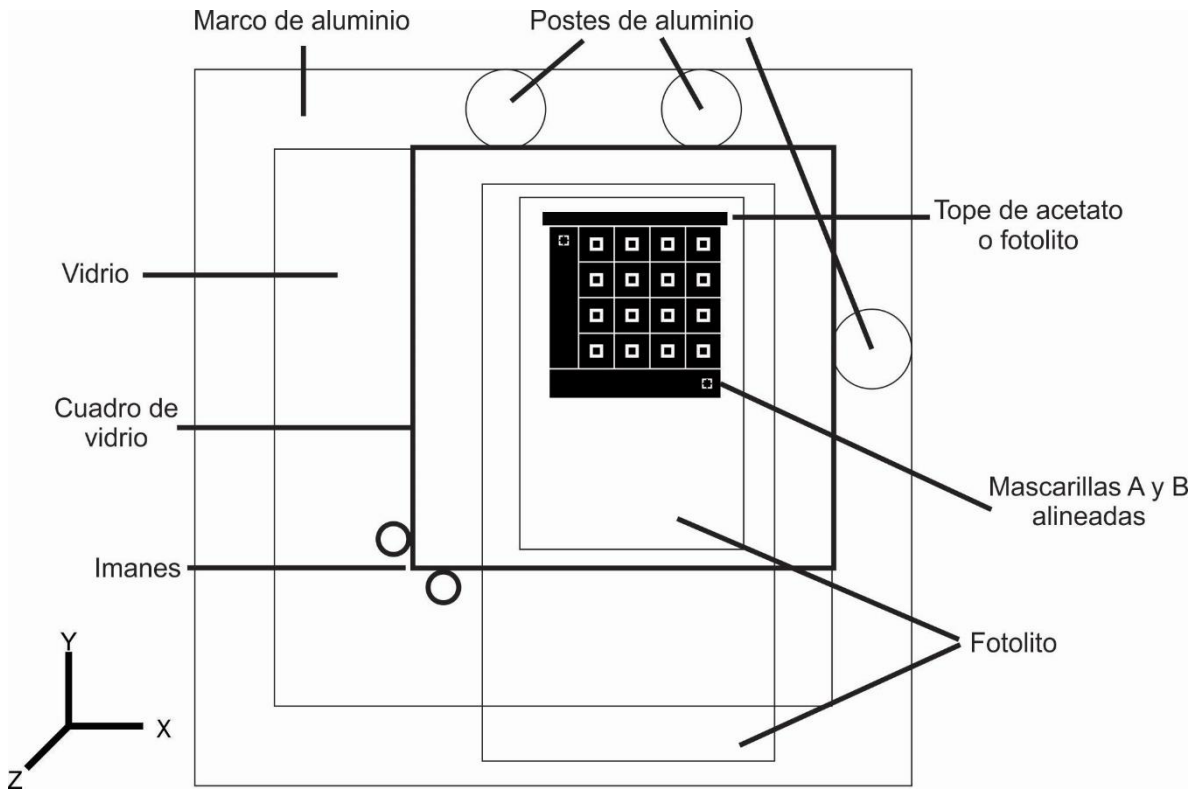


Figura C3.8 Mascarillas alineadas y fijas, listas para el fotolitogrado. La mascarilla B es el reflejo de la mascarilla A.

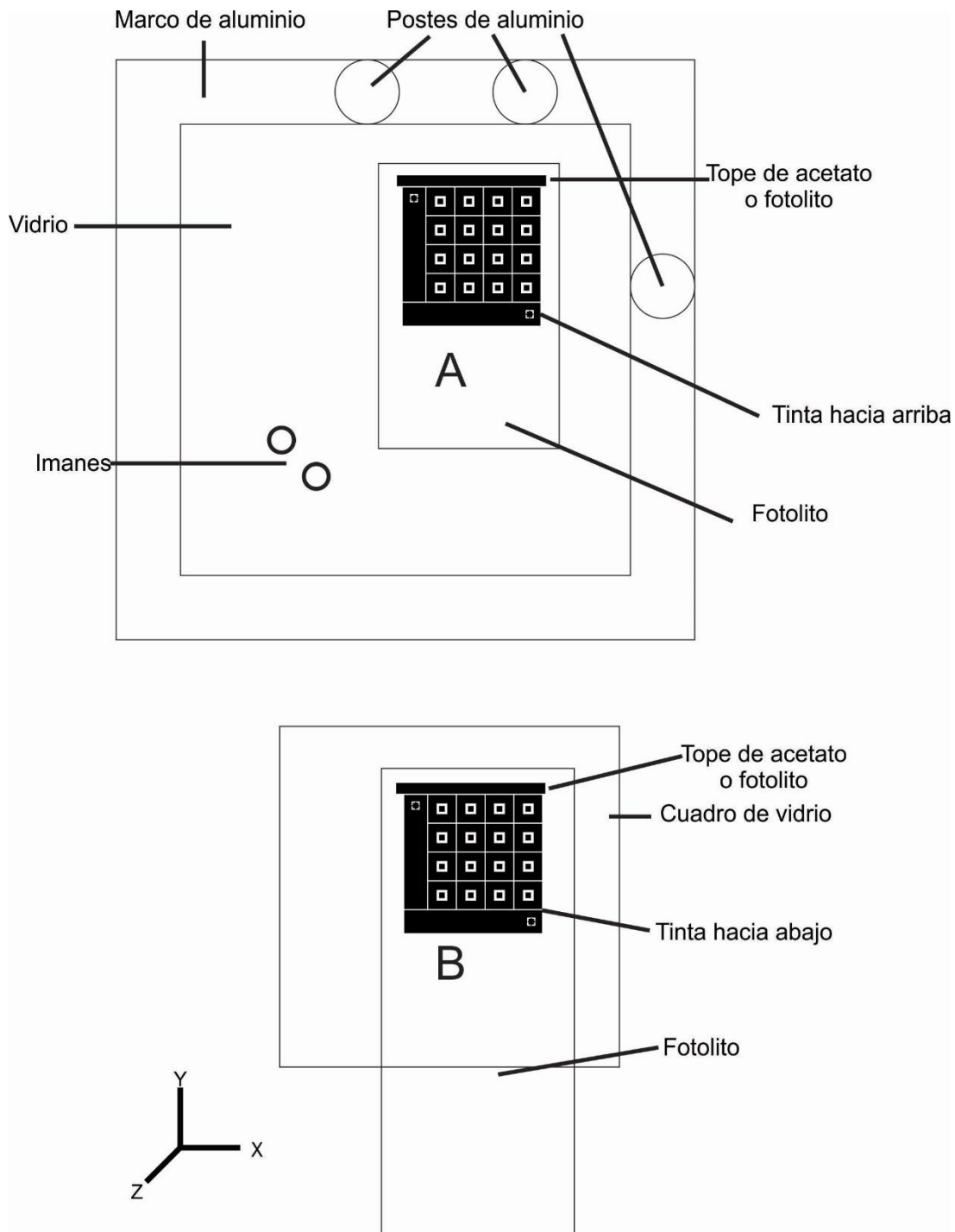


Figura C3.9 Estructura para alineación de mascarillas, se coloca B sobre A de acuerdo a las marcas de alineación.

3.2 Limpieza de las muestras.

Con el fin de eliminar los contaminantes de la superficie de las muestras, se utiliza una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) denominada "Piraña". Este método de limpieza elimina la contaminación orgánica de la oblea y disuelve partículas de la oxidación química del silicio. Removiendo cualquier contaminante orgánico se evita la oxidación incompleta del silicio, lo que puede provocar una contaminación parcial de nuestro material.

3.2.1 Elaboración de solución Piraña.

La solución Piraña es una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno en una relación de 3:1.

- En un contenedor vertimos 30ml de H_2SO_4 y le agregamos 10ml de H_2O_2 , vertiéndolo con cuidado debido a que la solución reacciona rápidamente.

3.2.2 Limpieza con Piraña.

- Sumergimos las muestras en la solución y los colocamos en una tina ultrasónica por 10 minutos.
- Se enjuagan las muestras con agua desionizada (*DI*), primero sumergiéndolas y posteriormente realizando un enjuague a presión mediante un aspersor de agua manual.
- Se elimina el exceso de agua utilizando una secadora para cabello convencional (secado manual). Este método de enjuague se repetirá a lo largo del proceso de fabricación.
- Se sumergen las muestras en la solución Piraña y se colocan en la tina ultrasónica por 5 minutos. Se repite el proceso de enjuague.

3.2.3 Sumergir en *HF*.

El ácido fluorhídrico se usa para eliminar óxidos nativos que se forman en la superficie del silicio con el contacto del aire.

Para eliminar óxidos nativos:

- Se sumergen individualmente las muestras en *HF* al 10%, entre 3 y 5 segundos.
- Se realiza el proceso de enjuague antes mencionado.

3.2.4 Sumergir en acetona y alcohol.

- Sumergimos las muestras en acetona y las colocamos en la tina ultrasónica por 4 min.
- Posteriormente se sumergen en alcohol por unos segundos.
- Secamos las muestras con una secadora para cabello convencional.

3.2.5 Secado en horno.

Para eliminar restos de humedad las muestras son colocadas en un horno con una temperatura entre 120 y 130°C durante 20 minutos.

3.3 Fitolitografía.

La fotolitografía (litografía o enmascaramiento) es el método usado para grabar los patrones deseados en muestras que están recubiertas con un polímero denominado resina fotosensible o fotoresina. Este polímero es sensible a la radiación UV, por lo que debe de ser protegido mediante las mascarillas.

3.3.1 Depósito de resina positiva.

Las muestras se recubren con un material protector de polímero basado en disolvente y luego se hacen girar a gran velocidad en una centrifugadora, que distribuye el protector en una capa delgada y uniforme.

- La muestra es colocada en un spiner (centrifugadora) y se sujeta mediante vacío.
- Se prueba la sujeción de la muestra activando el spiner por 4 segundos.
- A las muestras se le coloca 4 gotas de resina positiva en el centro de la muestra y se esparce evitando los bordes.
- Se activa el spiner entre 20 y 24 segundos, dependiendo de la cantidad de resina, a aproximadamente 2000 *rpm*. De esta manera la resina se reparte homogéneamente en toda la superficie de la muestra.
- Revisamos la muestra con el microscopio para comprobar que no existan aglomeraciones de resina en los bordes.

Debido a que las muestras deben de cubrirse con resina por las dos caras, esta etapa se repite después de realizar un precocido.



a)



b)

Figura C3.10 Proceso de depósito de resina usando un spinner (b) y revelado de patrones (a).

3.3.2 Precocido.

Para mejorar la adhesión así como provocar el endurecimiento de la resina y para evaporar el solvente existente en ella, se realiza un precocido en horno entre 80 y 90 °C durante 8 minutos para una cara de la muestra. Para la segunda cara el precocido es de 16 minutos.

3.3.3 Exposición.

La muestra recubierta con resina es expuesta a luz UV para transmitir los patrones de la mascarilla.

- La muestra se coloca en el bastidor alineándola con microscopio usando el tope de acetato o fotolito como guía.
- Se cubre la muestra alineada con el cuadro de vidrio (mascarilla B).
- Usando imanes se presiona la muestra para evitar que se mueva.
- La exposición se realiza en una campana extractora para reducir la cantidad de partículas que se adhieran a la resina y afecten la exposición.
- El bastidor se coloca sobre un fondo negro para evitar que la luz UV alcance la cara que no está siendo expuesta.
- La exposición se realiza durante 6 minutos por cara. Se utilizan 3 focos de luz UV de 15 watts cada uno.

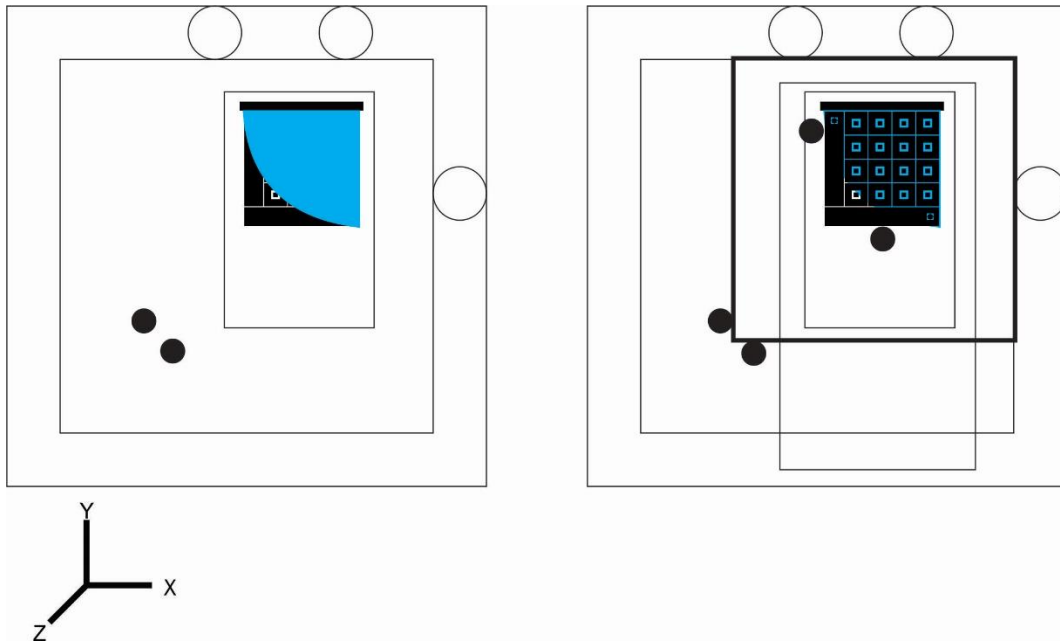


Figura C3.11 La muestra es colocada entre las mascarillas y se sujeta con imanes.

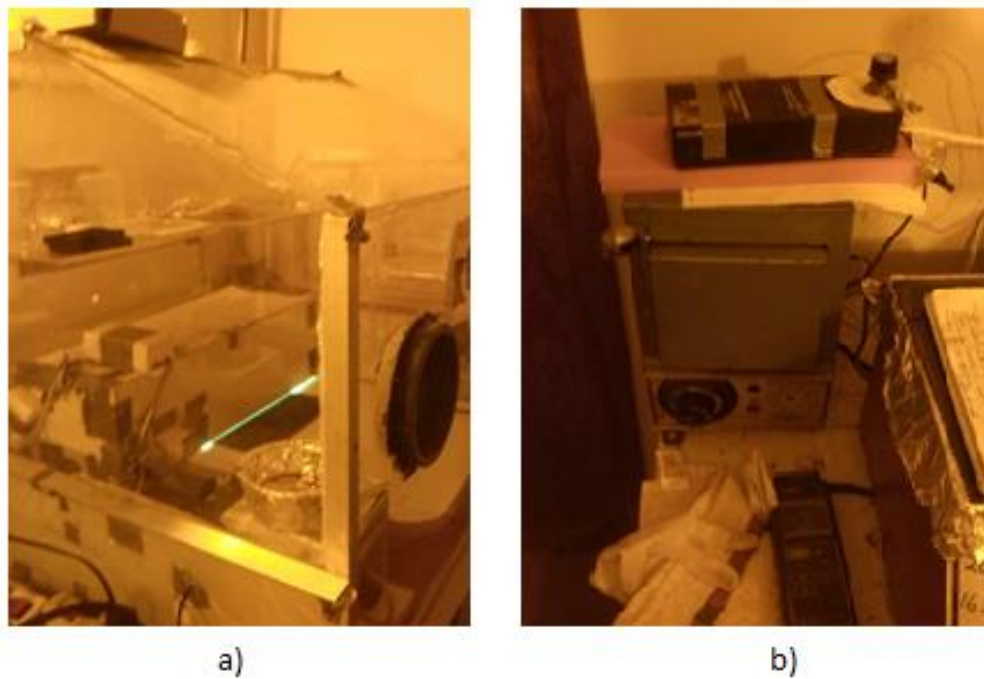


Figura C3.12 a) La exposición se realiza con luz UV en cada lado de la muestra. b) Horno con control de temperatura para recocido suave y duro

3.3.4 Revelado.

El revelado consiste en eliminar la resina que ha sido debilitada por la luz UV dejando grabado en la resina los patrones de las mascarillas. A la superficie cubierta

por la resina se aplica un revelador mediante la inmersión, el rociado o la atomización. El revelador utilizado para esto es una solución de hidróxido de sodio ($NaOH$) al 0.75% y agua desionizada. El protector que permanece tras el revelado protege la capa de óxido de la superficie durante la apertura de ventanas.

- Mezclamos 7.5ml de $NaOH$ al 10% y 92.5ml de agua desionizada.
- Sumergimos las muestras entre 15 y 20 segundos revisándolas en el microscopio cada 5 segundos.

Durante el revelado se puede observar los patrones en la superficie de las muestras, y una vez eliminada completamente la resina de las zonas deseadas es fácil diferencial el óxido de silicio de la resina.

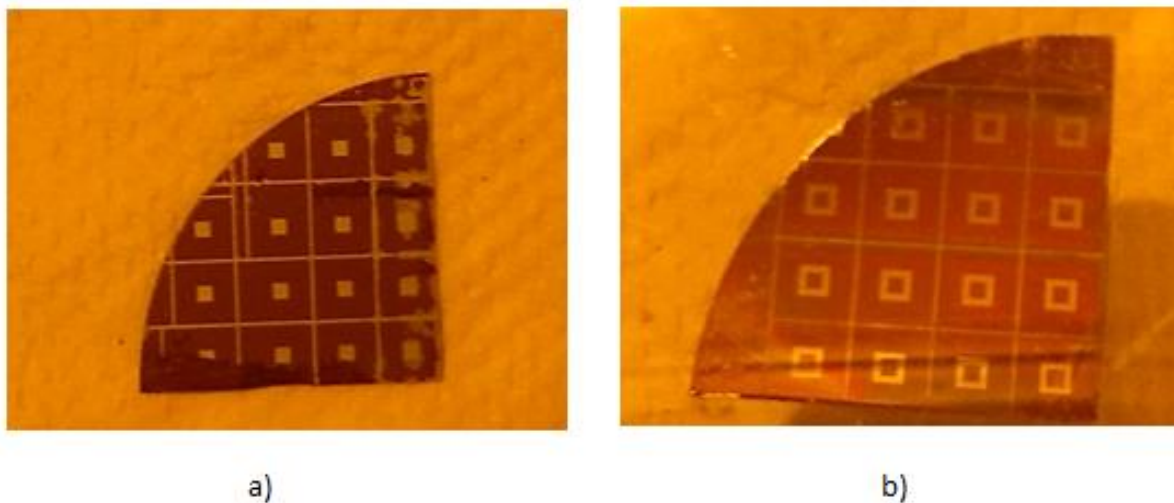


Figura C3.13 Muestra después del revelado, se aprecian los patrones del Boss y las calles en diferente tono al de la resina.

3.3.5 Recocido o Hard Baking.

El recocido es usado para endurecer la resina restante y mejorar la adhesión al sustrato. Para terminar el proceso de fotolitografía, la muestra ya revelada se mete al horno durante 20 minutos a una temperatura de entre 120 y 130°C.

En caso de que la resina se remueva de zonas que deseemos proteger, se puede realizar un retocado manual, cubriendo con resina las zonas mediante un pincel fino, antes de realizar el recocido.

3.4 Apertura de ventanas en el SiO_2 .

Comúnmente para abrir las ventanas en el óxido de silicio se utiliza una solución de fluoruro de amonio (NH_4F), ácido fluorhídrico (HF) y agua DI denominada Buffer,

esta solución tiene preferencia para atacar al SiO_2 que al silicio debido a que el primero es un material hidrofílico mientras que el segundo es un material hidrofóbico.

3.4.1 Elaboración de la solución.

Para la solución Buffer se disuelven 45grs de NH_4F en 75ml de agua *DI* utilizando una tina ultrasónica de 3 a 5 minutos, una vez disuelto se agrega 21ml de *HF* al 10%.

3.4.2 Ataque y monitoreo.

Para evitar que la resina se debilite y se desprenda de la muestra, la exposición a la solución debe de ser monitoreada. Para evitar esto las muestras deben de recalentarse continuamente para endurecer la resina.

- Se sumerge la muestra en la solución durante 2 minutos, moviéndola periódicamente.
- Se enjuaga, se seca manualmente y se observa con microscopio para comprobar el avance en el óxido. A diferentes espesores el óxido de silicio presenta diferentes colores, gracias a esto monitoreamos el avance.
- Para endurecer la resina se realiza el recocido de la muestra por 4 minutos.
- Se repiten los pasos anteriores hasta que se pueda observar el silicio a través de las ventanas abiertas en el óxido, la exposición al Buffer oscila entre 15 y 20 minutos.

3.4.3 Remoción de la resina.

Una vez abiertas las ventanas en el óxido de silicio, las muestras deben de limpiarse para remover la resina de la superficie. La limpieza se realiza mediante baños de acetona en ultrasonido, la acetona disuelve la resina y la remueve de la superficie de la muestra.

Se realizan 4 baños con acetona durante 5 minutos cada uno, en una tina ultrasónica. Tras el último baño se enjuaga y se elimina el exceso de líquido.

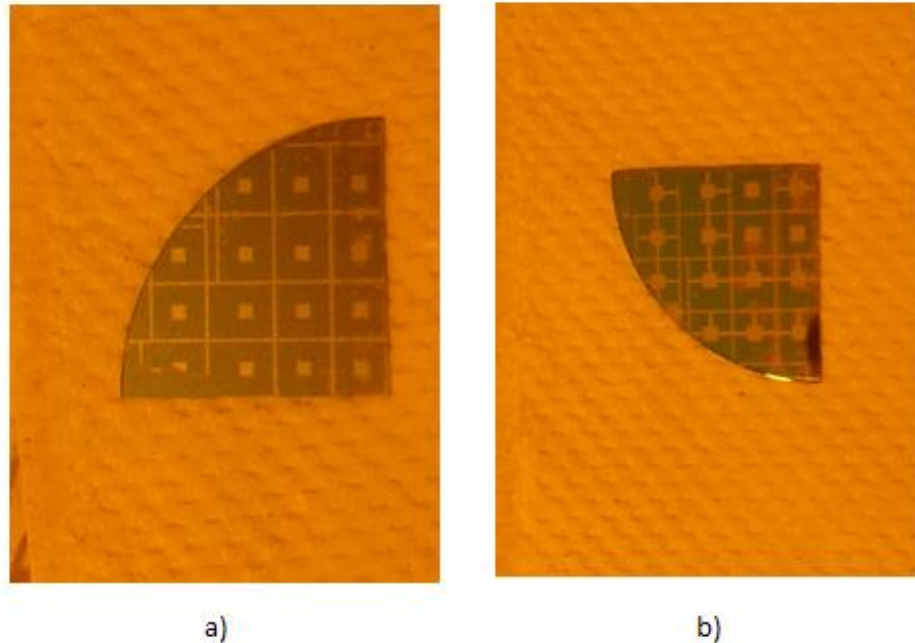


Figura C3.14 Ventanas abiertas en el óxido, muestra de silicio tipo P para contactos.

3.5 Ataque con *KOH*.

El maquinado de estructuras en silicio se realiza mediante ataques químicos anisotrópicos, este tipo de ataque actúa a diferentes velocidades dependiendo de la orientación cristalográfica del silicio. El atacante utilizado es una solución de hidróxido de potasio (*KOH*) y agua *DI*, esta solución ataca al silicio, de manera anisotrópica, a determinada velocidad dependiendo de su concentración y de la temperatura a la que se lleve. La Figura C3.15 muestra la razón de ataque del *KOH* para el silicio y el óxido de silicio, se observa que la razón de ataque aumenta conforme la temperatura y la concentración incrementan hasta un punto en donde, si se sigue incrementando la concentración, la velocidad empieza a disminuir. El avance del *KOH* al 40% a 70°C es aproximadamente $30\mu\text{m}/\text{hr}$ y a 80°C es de aproximadamente $50\mu\text{m}/\text{hr}$. Para este trabajo se considera el ataque de $40\mu\text{m}/\text{hr}$ entre 72-75°C para una solución de *KOH* al 40%. Mientras que para el óxido de silicio el avance bajo las mismas condiciones es de aproximadamente $0.15\mu\text{m}/\text{hr}$.

Realizar el ataque a temperaturas elevadas para disminuir el tiempo empleado implica tener un mejor control de la concentración de la solución dado que se pierde más rápido el agua de la solución; por lo que no es una buena opción aumentar la temperatura.

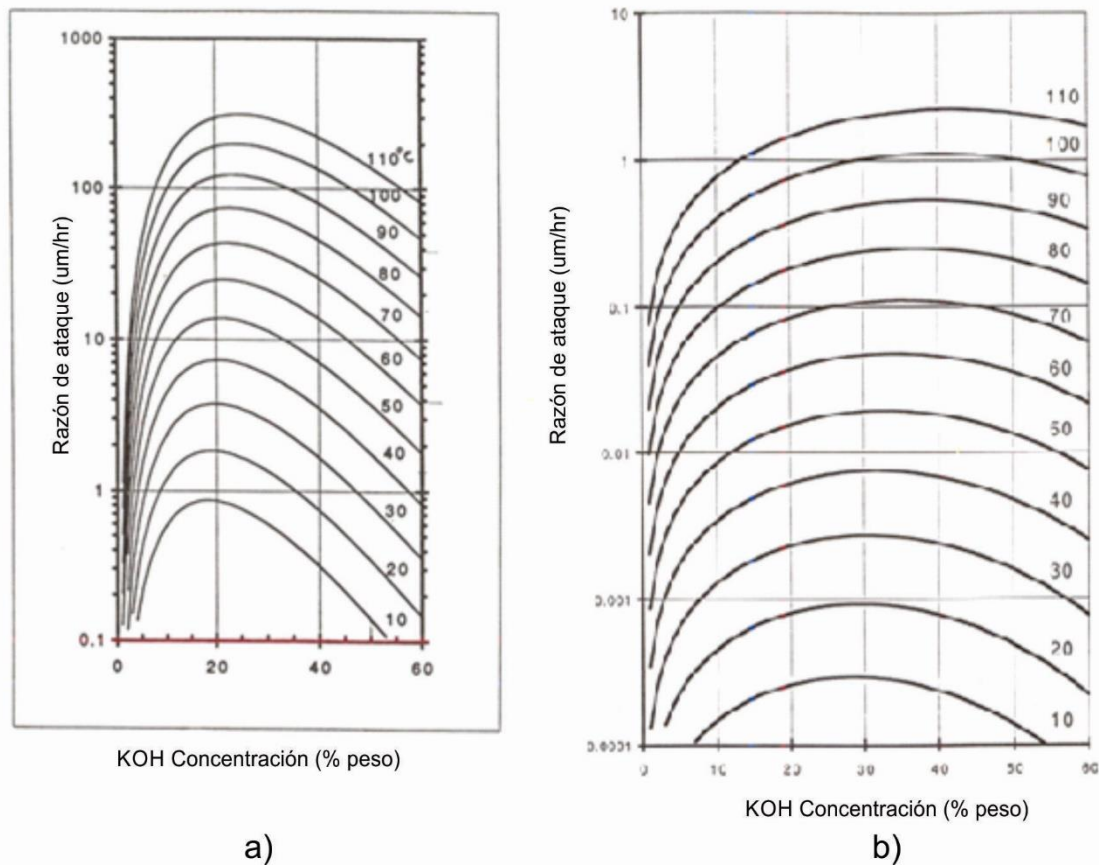


Figura C3.15 Concentración de KOH vs velocidad de ataque en Si (a) y SiO_2 (b).

3.5.1 Solución.

Para elaborar 50ml de solución de KOH en una concentración del 40% disolvemos 69.405gr de KOH en 50ml de agua desionizada, utilizando una tina ultrasónica. Corroboramos la concentración pesando 50ml de la solución, la medición debe de dar 69.405gr.

3.5.2 Razón de ataque - Si y SiO_2 .

Para saber el tiempo necesario de exposición de nuestra muestra en KOH para obtener la estructura deseada, es necesario conocer las velocidades de ataque de acuerdo a las orientaciones del silicio para diferentes temperaturas y concentraciones.

Durante el proceso se utilizan dos tipos de mascarillas, una para definir las calles que delimitan las estructuras y otra para el maquinado de las mismas. Para poder separar las estructuras fabricadas en una misma muestra las calles deben de ser maquinadas de tal manera que separar cada estructura no requiera mucho esfuerzo.

3.5.3 Cálculo de tiempos de ataque.

Las muestras deben de pasar por dos etapas de ataque, una para realizar un avance en las calles y la segunda para la fabricación del diafragma y Boss. Por esto se deben de realizar cálculos para las calles y para las estructuras, el avance de las calles es de $2.5\mu m$ de profundidad y el ataque para las estructuras es de $135\mu m$ de profundidad.

Cálculos para el silicio:

El ataque en el silicio es de $40\mu m$ en 60 minutos a una temperatura de $72-75^{\circ}C$, por lo que el tiempo necesario para obtener $2.5\mu m$ de avance en las calles es de:

$$t_1 = \frac{60min(5\mu m)}{40\mu m} = 3.75min \quad (15)$$

Para obtener $135\mu m$ de profundidad en la estructura necesitamos:

$$t_2 = \frac{60min (135\mu m)}{40\mu m} = 202.5min \quad (16)$$

El tiempo de ataque es de 202 minutos y 30 segundos.

Cálculos para el SiO_2 .

Durante el avance de calles el óxido se verá reducido en:

$$\mu_1 = \frac{(3.75min)0.15\mu m}{60min} = 9.375 \times 10^{-3} \mu m \quad (17)$$

Durante el ataque de $135\mu m$ en el silicio, el óxido se verá reducido en:

$$\mu_2 = \frac{(202.5min)0.15\mu m}{60min} = 0.50625\mu m \quad (18)$$

3.5.4 Maquinado.

Antes de realizar el ataque la muestra debe de ser sumergida en HF al 10% por 3 o 4 segundos para eliminar los óxidos nativos presentes en la superficie del silicio. El ataque anisotrópico con *KOH* se realiza mediante un contenedor termocontrolado, a temperatura constante, a modo de baño maría. La muestra debe de estar en movimiento constante durante todo el tiempo de ataque y la concentración de la solución se mantiene constante por medio de la dosificación de agua como compensación del agua evaporada debido a la temperatura empleada. Finalizado el ataque, la muestra se enjuaga y se seca en un horno entre 120 y 130°C durante 20 minutos.

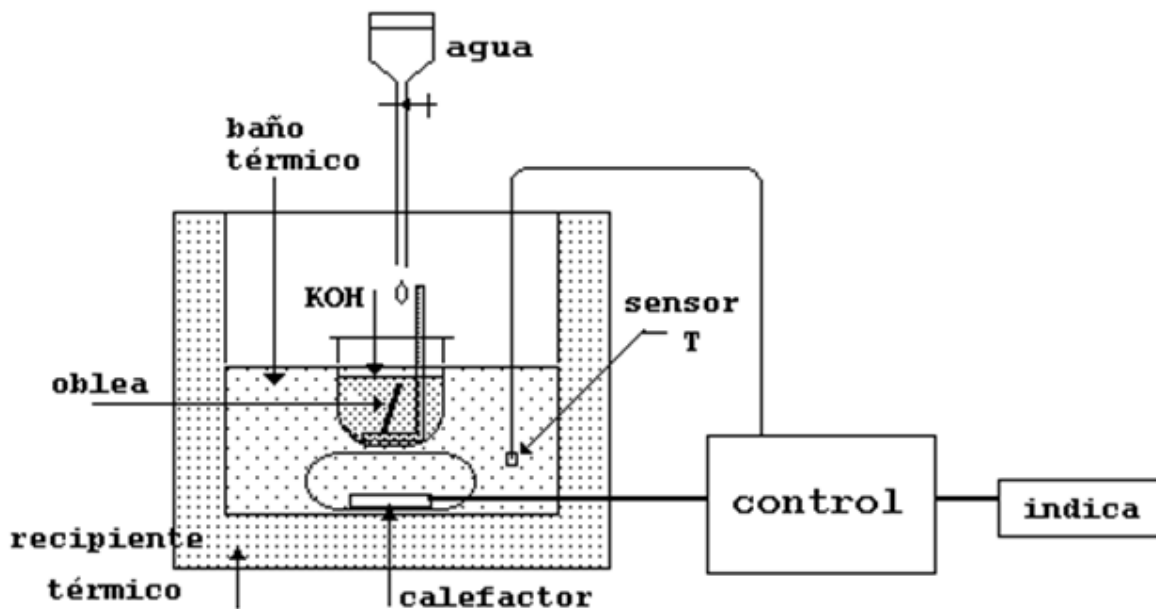


Figura C3.16 Ataque anisotrópico, utilizando un recipiente termo-controlado mantenemos la solución entre 72°C y 75°C.

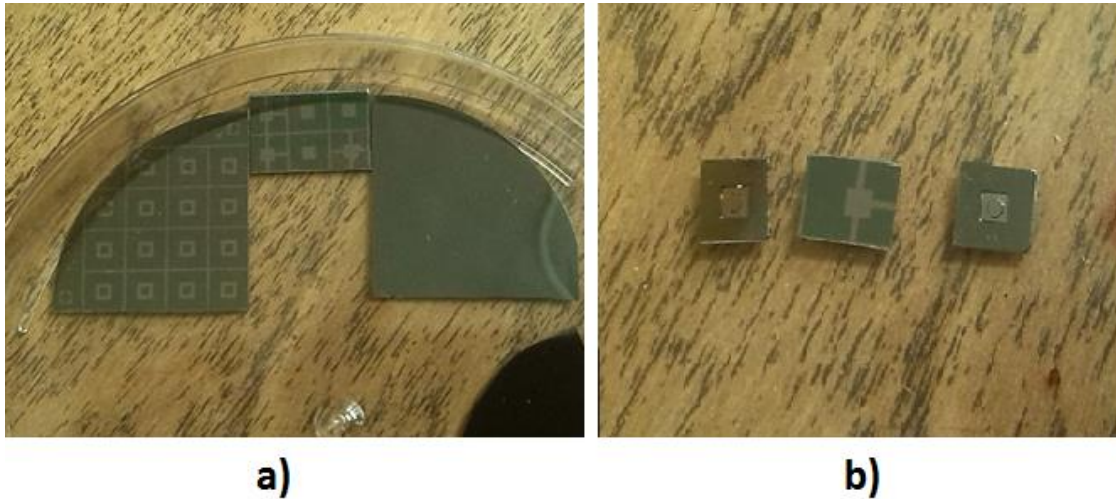


Figura C3.157 a) Muestras de silicio con ventanas abiertas en el óxido (izquierda y centro) y muestra de silicio sin procesar (derecha); b) Contacto de silicio tipo P (centro) y estructuras maquinadas (extremos).

Una vez maquinada la estructura el siguiente paso es remover el óxido de silicio presente en el Boss, finalmente se generan las estructuras propuestas para obtener el capacitor de placas paralelas deseado.

3.6 Remoción de óxido en el Boss.

Durante el maquinado con *KOH* el Boss es protegido con el mismo óxido de silicio de la oblea, sin embargo éste resulta perjudicial para el buen funcionamiento del capacitor en las dos arquitecturas propuestas. Debido a esto es necesario eliminar el óxido de la misma manera como se abren las ventanas en las muestras, protegiendo con resina al bastidor y eliminando el óxido con solución Buffer.

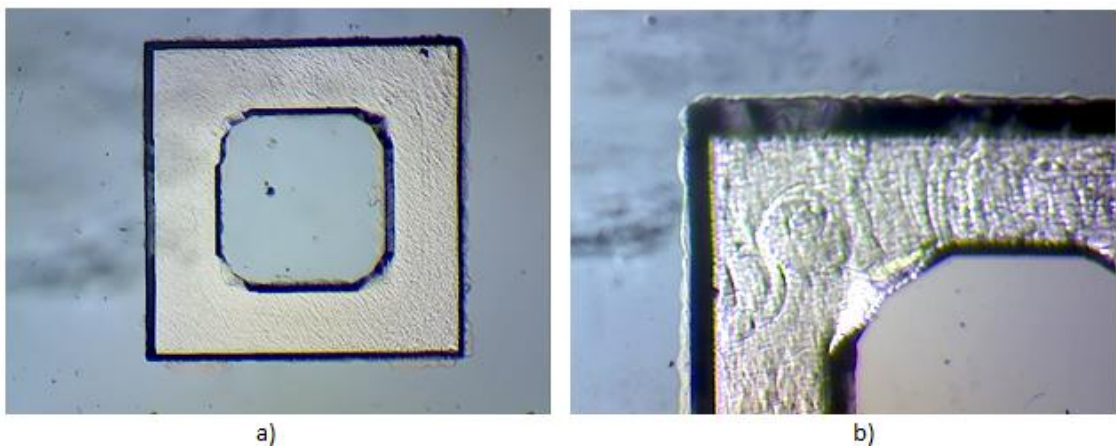


Figura C3.168 a) el óxido está presente en el bastidor y el Boss, mientras que en b) se aprecian dos tonos diferentes en la muestra, un tono para el óxido y otro más para la masa móvil.

3.7 Capacitor de placas paralelas.

Para realizar las mediciones del sensor, los capacitores deben de ser armados utilizando resina epóxica para fijar las estructuras a la película de oro y a los contactos de silicio, así como a un bastidor que permita manipularlos durante las mediciones. El vidrio donde se encuentra depositado el oro y una base de aluminio donde se colocan los contactos de silicio tipo p , funcionan como bastidor para los capacitores. La polarización y la medición se realizan a través de cables de cobre los cuales hacen contacto con el silicio y el oro mediante pasta conductora. Para proteger y manipular los cables sin dañar los contactos de los capacitores, se recubren y fijan con resina epóxica. Empleando un micromanipulador para colocar la resina y la pasta conductora se elabora el ensamblaje de las dos arquitecturas de capacitor. Las conexiones para las estructuras fabricadas se realizan en los bordes resultantes de las calles (Figura C3.1) y para los contactos de silicio tipo p se realizan en los bordes que quedan una vez cortados de la oblea de silicio (Figura C3.5).

3.7.1 Primera arquitectura.

El elemento sensitivo se acomoda encima de la película de oro y se sujeta mediante un peso colocado por encima. Mediante el micromanipulador se le coloca resina epóxica alrededor cubriendo el contorno evitando tocar el diafragma y el Boss; se deja libre una esquina de la estructura para realizar el contacto. Para conservar la distancia entre placas definida, es importante no colocar resina entre el oro y el silicio.

3.7.2 Segunda arquitectura.

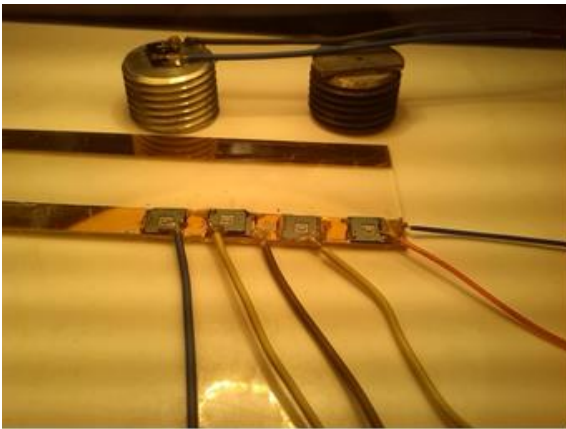
El contacto de silicio se fija al bastidor con resina epóxica, es importante no colocar resina por encima del contacto, se deja libre una esquina para realizar el contacto. Posteriormente la estructura se acomoda encima del contacto y se sujeta con un peso en la parte superior, evitando colocar resina entre ellos se cubre el contorno de la estructura para fijarlo, de igual manera se deja libre una esquina para realizar el contacto.

3.7.3 Elaboración de contactos.

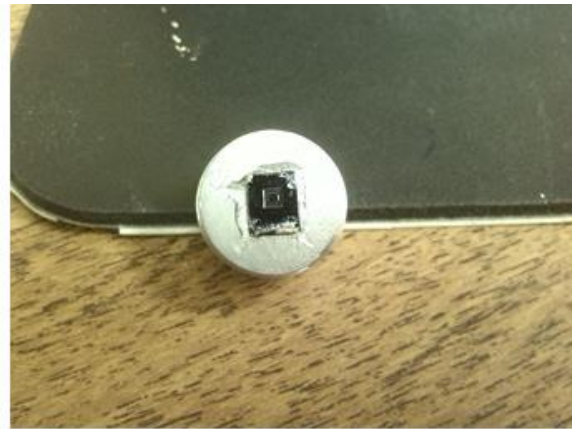
Denominamos contactos a la conexión entre los cables para las mediciones con las estructuras de silicio, la placa de silicio tipo p y la película de oro. Para esto se utiliza una mezcla de pasta de plata y catalizador en una relación de 3 a 1, que permite unir un cable de cobre con las placas del capacitor lo que permite realizar la polarización y la medición de capacitancia. Los contactos se elaboran utilizando un micromanipulador para la dosificación de la pasta conductora:

- Primera arquitectura: el primer contacto es en los bordes de las estructuras maquinadas (calles) evitando hacer contacto entre el silicio y el oro con la pasta. El segundo contacto se realiza en la película de oro, lo más cerca de la estructura.
- Segunda arquitectura: los contactos del silicio tipo p se elaboran en el bastidor haciendo un puente con la pasta entre el silicio y el bastidor. El contacto de la estructura se realiza en los bordes (calles) evitando tocar el silicio tipo p o el bastidor.

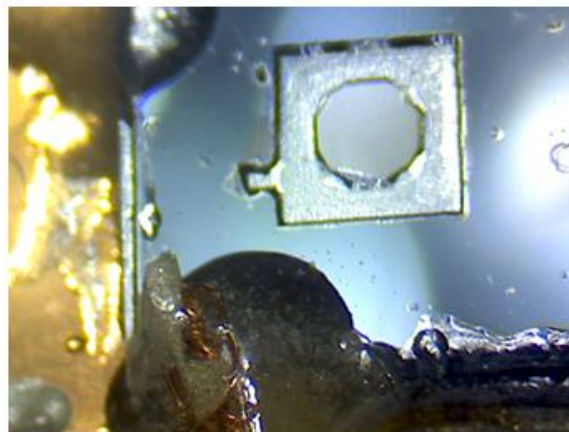
Realizado los contactos se coloca el cable presionándolo de tal manera que se adhiera a la pasta, se cubre con más pasta conductora. Es necesario que la pasta se seque completamente antes de recubrir los contactos con resina epóxica, esto demora aproximadamente 6 horas.



a)



b)



c)

Figura C3.179 el vidrio (a) y el bastidor de aluminio (b) permiten manipular las muestras durante las mediciones. Se debe evitar cubrir al diafragma y al Boss con resina epóxica o con pasta conductora (c).

Silicio tipo n		Silicio tipo p		Óxido de silicio	
Oro		Vidrio		Bastidor	
Resina epóxica		Pasta conductora		Contactos	

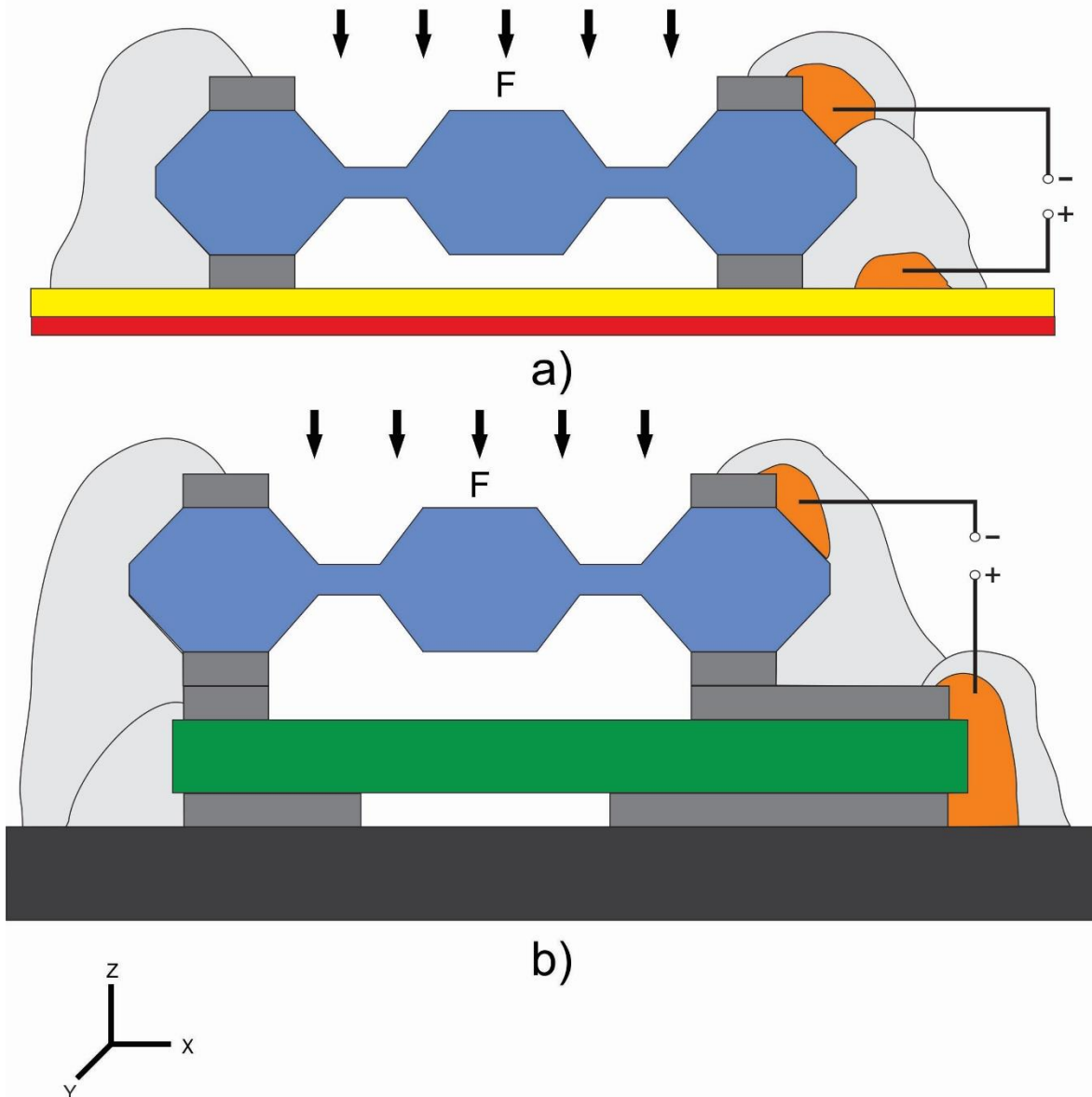


Figura C3.20 Se aplica un peso sobre la estructura (F) para evitar que se mueva mientras se coloca la resina epóxica, la pasta conductora junto con el contacto se recubren con resina para proteger y facilitar la manipulación durante las mediciones.

3.8 Resumen del proceso de fabricación del elemento sensitivo.

La Tabla T3.1 muestra las características de las mascarillas. Todas las mascarillas empleadas se imprimen mediante la técnica de fotomecánica.

Tabla T4.1 Mascarillas.

Tipo de mascarilla.	Descripción.	Características.	Dimensiones.	Comentarios.
Calles	<i>Mascarilla empleada para la definición y el avance de las calles que delimitan a las estructuras.</i>	<i>Marca el contorno de las estructuras, 16 por muestra. Tiene dos marcas de alineación.</i>	Mascarilla: 2.5x2.5 cm Ventanas para calles: 220 μ m Estructura: 5x5 mm	Las calles permiten separar las estructuras reduciendo el riesgo de dañarlas.
Estructuras	Mascarilla empleada para le maquinado de las estructuras.	Trabaja 16 estructuras por muestra. Tiene dos marcas de alineación.	Mascarilla: 2.5x2.5 cm Estructura: 5x5 mm Boss: 1x1 mm Ventana para Diafragma: 440 μ m	
Contactos	Mascarilla empleada para elaborar los contactos de silicio.	Marca el contorno y los contactos de silicio. Tiene ventanas para generar el capacitor y para contactos, éstos sirven para realizar mediciones.	Mascarilla: 2.5x2.5 cm Ventanas para contactos: 1.7x1.7 mm Contactos: 5x6mm Ventanas para calles: 220 μ m	Se usan dos mascarillas: cara interna para la estructura y cara externa para mediciones.
Mascarilla en espejo	Mascarillas empleadas para realizar el ataque por las dos caras de las muestras.	Es la imagen en espejo de las mascarillas para calles y estructuras.	Tiene las mismas dimensiones que las mascarillas para calles y estructuras.	

La siguiente tabla muestra el equipo y herramientas básicas necesarias para la aplicación de la técnica de Micromaquinado.

Tabla T3.2 Equipo y material de trabajo

Equipo y material.	Descripción.	Comentarios.
Laboratorio	<i>Laboratorio básico de química con luz de protección amarilla, campana extractora y lavabo.</i>	Un laboratorio que cuente con los materiales y equipo necesarios para trabajar.
Horno	Horno con control de temperatura y que alcance por lo menos 190°C	
Spiner	Spiner con conexión a vacío y que alcance las 2000rpm.	
Microscopio	Microscopio básico para laboratorio de química, con luz de protección amarilla.	Con aumento suficiente para observar estructuras del orden de micrómetros.
Bomba de vacío	Bomba para generar vacío.	La bomba debe de estar conectada al spiner para sujetar las muestras.
Impresora laser	Impresora láser con una resolución de por lo menos 1200ppp de resolución.	Se puede sustituir por impresiones mediante fotomecánica.
Balanza analítica	Balanza para medir masa.	Con una resolución de milésimas de gramos
Sustancias químicas	Agua DI, ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno, ácido fluorhídrico, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, fluoruro de amonio, resina fotosensible, acetona, alcohol.	
Herramientas de laboratorio	<i>Herramientas comunes de laboratorio como son bata, pinzas, vasos de precipitados, cajas Petri, probetas, etc.</i>	
Pincel o pluma de ave	Cualquier pincel fino o pluma de ave con el cual se pueda realizar un retocado de las muestras con resina.	También se usan plumas de ave para remover polvo que se vaya asentando en la muestra o mascarillas durante el proceso.

Luz UV	Fuente de luz UV con una potencia de por lo menos 45Watts.	Se requiere de un espacio cerrado con fondo negro donde se coloque la muestra y se asegure una exposición total a la luz UV.
Campana extractora para la exposición	Área cerrada con extractor en donde se realiza la exposición a luz UV.	

Equipos utilizados en la fabricación del sensor de presión capacitivo.

La Tabla T3.3 presenta los pasos de la fabricación del sensor de presión capacitivo.

Tabla T4.3 Pasos, características y anotaciones del proceso de fabricación del dispositivo.

Etapa.	Descripción.	Características.	Notas.
Mascarilla	<i>Dibujo utilizado para transmitir los patrones en la muestra durante el proceso de fotolitografía.</i>	Imagen generada con resolución de 2400ppp, impresión de positivo en fotolito de polímero. Mascarillas generadas en espejo para ataque de las dos caras de la muestra.	Uso de CorelDraw x6 para diseño y elaboración de mascarillas. Impresión de mascarilla mediante técnica de fotomecánica.
Limpieza con piraña	Limpieza de muestras para eliminar restos orgánicos y óxidos nativos.	Solución de 30ml de H_2SO_4 + 10ml de H_2O_2 , se sumerge muestra en solución (10min) y se enjuaga. Sumergir muestra por 5min Y enjuagar. Sumergir 3s – 5s en HF y enjuagar. Sumergir en acetona durante 4min, sumergir en alcohol. Secar en horno 20min entre 120°C – 130°C.	El enjuague se realiza sumergiendo las muestras en agua DI y después enjuague a presión. Se usa secadora manual para eliminar humedad. La limpieza con piraña y el enjuague con acetona se realizan en tina ultrasónica.
Fotolitografía	Proceso para generar patrones en la muestra y abrir ventanas en el óxido. Preparación de muestras para ataque.	Depósito de resina en muestra mediante spinner, Usar 4 gotas de resina y activar spinner por 24s a aproximadamente 2000rpm. Precocido a 80 – 90 °C en horno por 8min. Repetir para otra cara de la muestra, precocido por 16min. Exposición a luz UV	Se usa resina+, para la exposición se usan 3 focos de luz UV de 15 Watts c/u. Sumergir muestra en solución por 5s, enjuagar y secar para revisión en microscopio. Se repite hasta poder observar el óxido a través de las

		durante 6min por lado. Revelado con solución de 7.5ml de NaOH al 10% + 92.5ml de agua DI. Revelado durante 15s – 20s. Recocado en horno entre 120°C- 130°C por 20min.	ventanas en la resina (15s – 20s).
Apertura de ventanas en SiO ₂	El óxido de silicio es removido de la muestra en las zonas definidas por el proceso de fotolitografía.	Solución buffer para remover óxido, 45grs de NH ₄ F + 75ml de agua DI + 21ml de HF. Sumergir muestra en solución 2 minutos, enjuagar y recocer (4min de 120°C – 130°C), repetir hasta abrir ventanas en el óxido (15min-20min). Eliminar resina restante con acetona, enjuagar y secar en horno entre 120°C – 130°C durante 20 min.	Disolver primero el NH ₄ F en el agua DI y agregar HF. Se ataca con la solución durante 2min, se enjuaga y revisa el avance del óxido en microscopio. El óxido presenta diferentes coloración de acuerdo a su espesor. Realizar 3 baños con acetona, 5min en tina ultrasónica.
Ataque con KOH	El sustrato es maquinado para elaborar la estructura diseñada.	Solución para atacar el silicio, 50ml de agua DI + 69.405grs de KOH. Se realiza un avance en las calles antes de maquinar la estructura, se sumerge la muestra en la solución durante 3min 45s. El ataque para definir la estructura dura 202min 30s. Se enjuaga y se seca en horno durante 20min entre 120°C y 130°C	El ataque con solución de KOH _{40%} Temperatura entre 72°C y 75°C. Ataque del silicio de aproximadamente 40µm/hr. -Ataque del óxido de aproximadamente 0.15µm/hr.
Remoción de óxido en Boss	El óxido presente en la masa móvil se remueve para obtener la separación entre las placas del capacitor.	Se realiza el mismo procedimiento utilizado en el la apertura de ventanas en el óxido de silicio, protegiendo el bastidor con resina+.	La resina es colocada de manera manual para evitar dañar la estructura. La limpieza se realiza sumergiendo la muestra durante 15 min en cada baño y moviendo periódicamente.

Ensamblaje de los capacitores de placas paralelas	Los capacitores se forman a partir de las arquitecturas propuestas.	Mediante resina epóxica se fija el elemento sensible y el contacto de Si tipo p al vidrio con oro y al bastidor de aluminio, respectivamente. Los cables utilizados para las mediciones se adhieren a la estructura, oro y contacto de silicio con pasta conductora.	Los contactos para las mediciones se protegen con resina epóxica para poder ser manipulados sin dañar al sensor. El uso de un micromanipulador y un microscopio es indispensable para realizar los contactos y evitar dañar al diafragma y Boss.
---	---	--	--

Proceso de micromaquinado utilizado en laboratorio del Centro de Investigación de Dispositivos Semiconductores, [25] [26].

Capítulo 4

4. Resultados.

Las mediciones realizadas a las estructuras fabricadas y de los capacitores obtenidos permiten determinar el espesor del diafragma, el desplazamiento del Boss y la capacitancia generada.

4.1 Medición del espesor del diafragma.

El espesor del diafragma es de gran importancia para comprobar el funcionamiento de la estructura, por lo que se realizan pruebas para medir el espesor alcanzado durante el proceso de fabricación.

Para evitar realizar pruebas mecánicas que comprometan la integridad de las estructuras maquinadas, la técnica de transmitancia en el infrarrojo (IR) nos permite medir el espesor del diafragma. Mediante un LED de luz infrarroja de GaAs tipo H21A1 con emisión en $\lambda = 0.9 \mu m$ y un fototransistor de silicio tipo H21A2, de respuesta relativa promedio del 75% en el rango de 0.7 a 0.95 μm , se realizan las mediciones. El emisor y receptor son alimentados con fuentes independientes ajustables de corriente regulada, la sensibilidad se calibra con un galvanómetro a 250 μA en escala máxima, con un indicador de la luz transmitida sin muestra de por medio (I_0), con un potenciómetro de ajuste de diez vueltas, [26]. La muestra a medir se coloca entre el emisor y el receptor, la luz transmitida se atenúa por la absorción del silicio y ésta se mide en el galvanómetro (I_t). Mediante la siguiente expresión se calcula el espesor del diafragma:

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\alpha h} \quad (19)$$

Donde:

- I_t es la intensidad transmitida.
- I_0 es la intensidad inicial directa.
- α es el coeficiente de absorción del material. Para la longitud del IR ($\lambda = 0.9 \mu m$), el coeficiente de absorción del silicio es de $\alpha = 400 \text{ cm}^{-1}$.
- h es el espesor del diafragma.

La medición obtenida es en Volts, para la luz transmitida directamente del emisor al receptor el valor es de $I_0 = 11.2V$; los valores de h tienen unidades de μm . Se realizaron 5 mediciones por muestra, a un total de 5 estructuras maquinadas:

Tabla T4.1 Medición del espesor del diafragma para 5 dispositivos fabricados.

Medición	M1		M2		M3		M4		M5	
	V	μm	V	μm	V	μm	V	μm	V	μm
1	7.6	9.46	7.5	9.8	7.3	10.47	7	11.52	7.3	10.47
2	7.4	10.13	7.3	10.47	7.3	10.47	7.2	10.82	6.9	11.88
3	7.5	9.8	7.5	9.8	6.9	11.88	7.3	10.47	7	11.52
4	7.6	9.46	7	11.52	7.2	10.82	7.3	10.47	6.9	11.88
5	7.4	10.13	7.2	10.82	6.8	12.25	7	11.52	7.2	10.82
Promedio		9.796		10.482		11.178		10.96		11.314

De acuerdo a los cálculos realizados en la etapa del micromaquinado, el espesor de los diafragmas que se obtienen es de $10\mu\text{m}$ mientras que los valores reales oscilan entre 9.7 y $11.4\mu\text{m}$; sin embargo estos valores permiten realizar las mediciones de capacitancia sin alterar de manera significativa los resultados esperados.

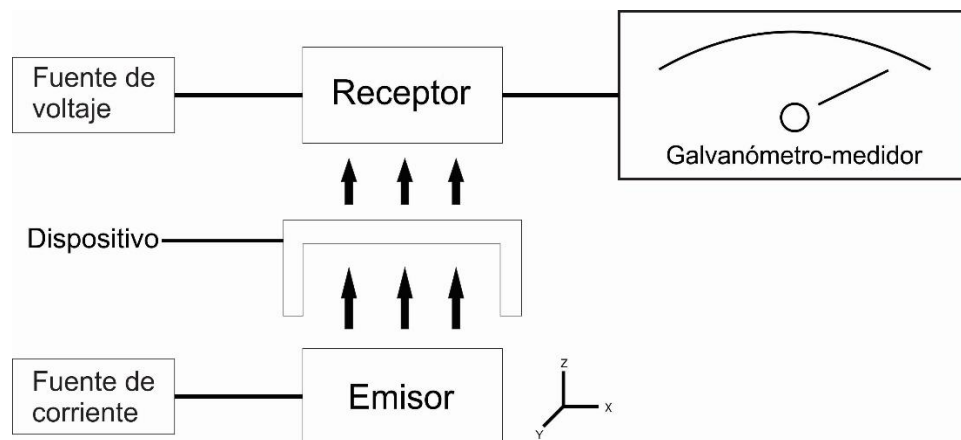


Figura C4.1 Componentes del equipo de medición de transmitancia.

4.2 Medición de la capacitancia para las dos arquitecturas empleadas.

La medición de capacitancia se realiza con el medidor de precisión LCR Keysight E4980AL:

- 20-300kHz.
- 4 dígitos de resolución
- 0.05% de precisión básica con repetitividad de medición a baja y alta impedancia.
- 100 μV a 2 V_{rms} .
- 1 μA a 20 mA .

- DC bias 1.5/2 V.
- 201 puntos por barrido.

Para compensar las capacitancias parásitas que se presentan en los cables con los que se realizan las mediciones, la calibración del equipo junto con las conexiones del capacitor es necesaria; esta calibración es una función del equipo por lo que no es necesario realizar ningún tipo de ajuste externo. Los elementos sensitivos se conectan con la terminal negativa del equipo, mientras que a la terminal positiva se conecta la película de oro y el silicio tipo P.

Se realiza una medición de control con un capacitor comercial a diferentes frecuencias; se realizan mediciones de 6 dispositivos, 3 por cada arquitectura propuesta, a las mismas frecuencias que el control. Las mediciones se realizan en picofaradios. Las muestras M1, M2, y M3 son estructuras de la segunda arquitectura.

Tabla T4.2 Valores de capacitancia para las 2 arquitecturas propuestas.

Hz	Control: 22pf	M1 (pf)	M2 (pf)	M3 (pf)	M4 (pf)	M5 (pf)	M6 (pf)
20	22.37	9.67	6.01	13.1	29.6	22.5	25.2
100	21.804	4.4	2.99	6.9	24.3	16.05	19.4
1k	19.6	2.13	2.18	2.3	21.96	12.87	10.43
10k	4.82	1.525	1.83	1.4	19.7	11.24	6.7
100k	0.113	1.225	1.56	1.19	16.81	10.08	5.39
1M	0.0695	1.01	1.44	1.04	13.23	8.78	5.15

De acuerdo a los cálculos realizados para la primera estructura el valor de la capacitancia esperada, con una distancia entre placas de $0.5 \mu m$, es de $17.7 pf$; mientras que para la segunda estructura se prevé $6 pf$. Las capacitancias obtenidas son aceptables considerando que las dimensiones reales de la estructura son aproximaciones de los cálculos realizados para el micromaquinado.

4.3 Medición del desplazamiento del Boss y obtención de la constante de restitución del diafragma.

La obtención de la constante de restitución del diafragma se realiza mediante la aplicación de un peso de valor conocido sobre el Boss a la par que se mide la capacitancia. Para la medición se utiliza el mismo equipo que en la sección anterior.

Se utiliza una pulsera anti estática para reducir los efectos del ruido sobre las mediciones. Para evitar dañar las estructuras durante la colocación del peso sobre

el Boss, se utiliza una guía para dirigir una aguja (de 0.019grs) la cual se deja caer sobre la masa. La manipulación se realiza mediante pinzas no magnetizadas. La medición se divide en 3 sub-mediciones: 1) medición de la capacitancia del dispositivo sin peso, 2) medición de la capacitancia con el efecto del ruido generado por la presencia de objetos y 3) medición de la capacitancia con el efecto del ruido y el peso aplicado. Se utilizan 2 muestras diferentes a las empleadas en la medición de capacitancia, los capacitores empleados presentan valores diferentes a los calculados debido a un mal proceso de ensamblaje.

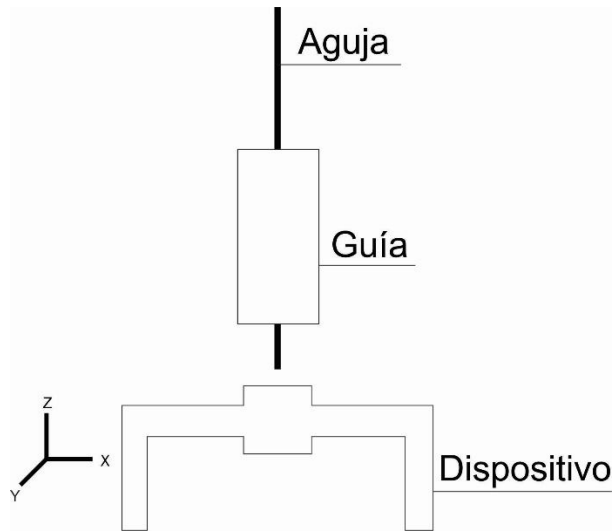


Figura C4.2 La aguja se deja caer sobre el Boss para medir el cambio de capacitancia.

Tabla T4.3 Variación de capacitancia de la estructura.

Medición	M1				M2			
	Sin peso (pf)	Ruido (pf)	Con peso (pf)	ΔC (pf)	Sin peso (pf)	Ruido (pf)	Con peso (pf)	ΔC (pf)
1	1.58	1.32	1.35	0.03	12.02	11.93	11.99	0.06
2	1.58	1.23	1.25	0.02	12.16	11.9	11.98	0.06
3	1.6	1.26	1.29	0.03	12.29	12.05	12.09	0.04
4	1.62	1.21	1.23	0.02	12.27	12.04	12.08	0.04
5	1.59	1.18	1.21	0.03	12.28	12.04	12.09	0.05
6	1.9	1.83	1.89	0.06	11.35	10.97	11.01	0.04
7	1.98	1.8	1.84	0.04	11.73	11.34	11.36	0.02
8	2.25	1.93	1.96	0.03	10.39	10.09	10.14	0.05
9	1.86	1.53	1.57	0.04	10.36	10.97	10.01	0.04
10	2.02	1.75	1.79	0.04	10.62	9.81	9.87	0.06

Tomando como promedio de las variaciones el valor de 0.04 pf , obtenemos un valor de capacitancia, sustituyendo este valor en la ecuación (10) obtenemos la distancia entre placas necesaria para generar dicha capacitancia. El desplazamiento de acuerdo a la ecuación (11) permite obtener la constante de restitución del diafragma.

- Establecemos la capacitancia base como 5.9 pf y la distancia $d_0 = 1.5 \mu\text{m}$.
- La nueva capacitancia es $C = 5.94 \text{ pf}$ y $d_1 = 1.49057 \mu\text{m}$.
- La constante k queda como $k = \frac{(0.000019 \text{ kg} * 9.81)}{(1.5 \mu\text{m} - 1.49057)} = 18444.3$.

La ecuación que describe el desplazamiento de la estructura es:

$$y = \frac{F}{k} = \frac{F}{18444.3} \quad (20)$$

F es la representación de la presión (recordemos que $P=F/A$) aplicada a la estructura, finalmente calculamos el máximo desplazamiento del Boss al aplicarle una fuerza de 0.04 N (equivalente a 40 kPa).

$$y = 2.16869 \mu\text{m} \quad (21)$$

El desplazamiento resultante es de aproximadamente el doble del resultado de la simulación de la estructura fabricada.

La ecuación de desplazamiento mediante la ley de Hooke nos permite obtener la relación de presión y capacitancia, donde la capacitancia queda en términos de la fuerza aplicada a la masa.

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A}{d_0 - y} = \epsilon_0 \frac{\frac{Ad_0}{d_0}}{d_0 \left(1 - \frac{y}{d_0}\right)} \quad (222)$$

Dónde la distancia entre placas es definida por:

$$d_1 = d_0 - y \quad (233)$$

Se sabe que la capacitancia inicial C_0 es:

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d_0} \quad (244)$$

Además, cuando el desplazamiento es significativamente menor a la distancia entre placas ($y \ll d_0$) podemos descomponer la expresión $\left(1 - \frac{y}{d_0}\right)$ en una serie de sumas.

$$\left(1 - \frac{y}{d_0}\right)^{-1} = 1 + \frac{y}{d_0} + \frac{y^2}{d_0^2} + \dots = \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) \quad (255)$$

Al sustituir las ecuaciones (20), (24) y (25) en la ecuación (22) obtenemos:

$$C_1 = C_0 \left(1 + \frac{y}{d_0}\right) = C_0 \left(1 + \frac{F}{kd_0}\right) \quad (266)$$

Al aplicar una fuerza en la masa, se obtiene una distancia entre las placas diferente, lo que provoca una nueva capacitancia. En la Figura C4.3, se observa el cambio de capacitancia respecto a la distancia entre las placas causada por una presión aplicada.

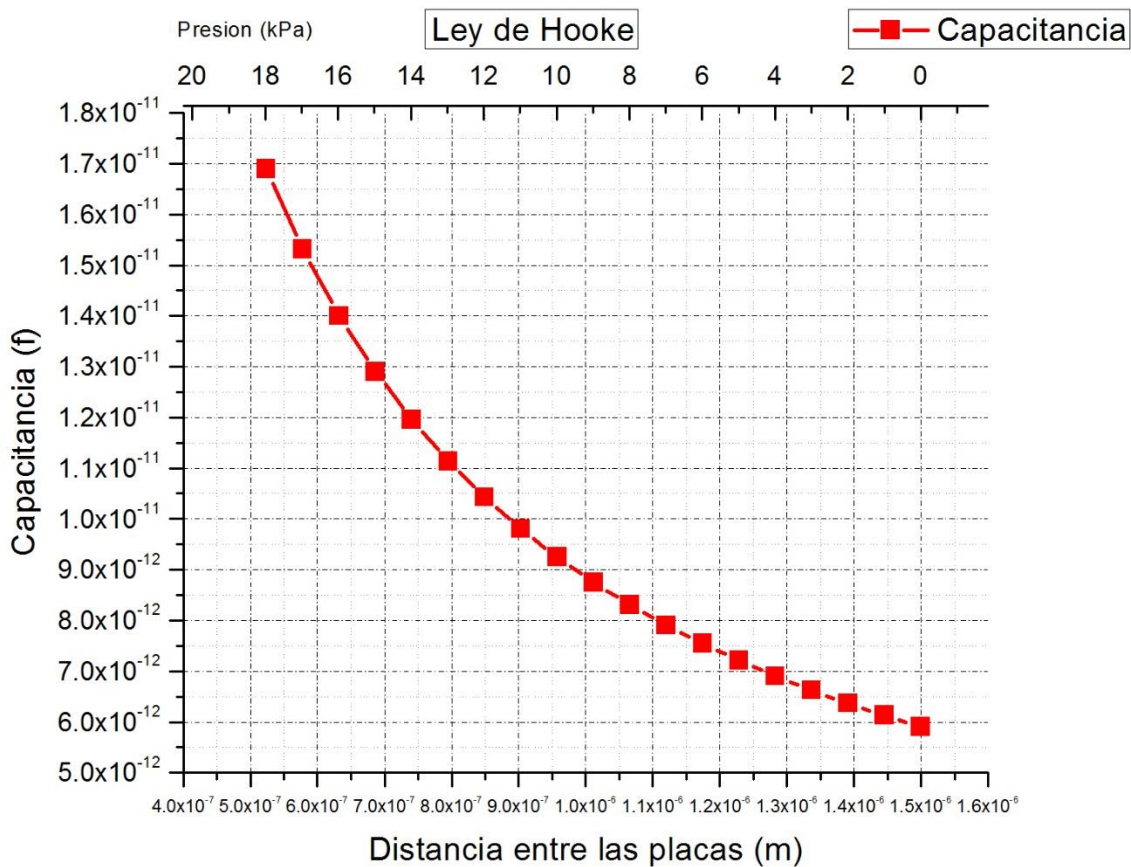


Figura C4.3 Cálculo de la capacitancia respecto al desplazamiento mediante la ley de Hooke.

Conclusiones

El proceso de fabricación empleado permite obtener dispositivos funcionales, aunque no se cuente con equipo ni instalaciones de primer nivel.

El uso de capacitores es una buena alternativa para la medición de diferentes presiones, cualquier variación en sus características físicas causa un cambio en su capacitancia lo que facilita la medición y esto es una gran ventaja sobre otros métodos.

Al emplear el óxido de silicio presente en las muestras, fue posible obtener la distancia entre las placas del capacitor para la fabricación del sensor.

Obtener un modelo matemático que analice el sistema Boss-Diafragma es importante para la caracterización del sensor y para fines prácticos, la ley de Hooke nos permitió determinar de manera empírica el desplazamiento del sistema, como una alternativa para analizar su comportamiento.

De acuerdo a las simulaciones y a los modelos matemáticos, podemos considerar el desplazamiento del Boss como lineal y sin deformación lo que provoca que el comportamiento de la capacitancia sea fácil de analizar; gracias a esto fue posible hacer uso de la ecuación básica de un capacitor de placas paralelas para determinar las capacitancias esperadas del sensor, esto junto con la simulación, realizamos una aproximación a los valores reales del dispositivo.

Es común encontrar que los sensores de presión capacitivos otorguen valores muy pequeños de capacitancia además de la deformación del diafragma, complicando la medición; el sensor fabricado resuelve este problema utilizando el Boss como una placa no deformable y con un área considerablemente grande.

No contar con un control estricto en el proceso de fabricación, nos obliga a realizar pruebas de cada una de las etapas para determinar la mejor forma de fabricar el dispositivo deseado. Esto significa que el proceso requiere de calibración antes de fabricar otro dispositivo.

La pasta conductora nos permite realizar las mediciones de nuestro dispositivo fabricado, aunque no presenta las mejores características para funcionar como contacto. A causa de las limitaciones del laboratorio y equipo con que se cuentan, utilizar como medio de conexión la pasta conductora es una manera sencilla y viable para realizar mediciones preliminares de cualquier dispositivo que se fabrique mediante la técnica propuesta.

La estructura de aluminio utilizada para la etapa de exposición a luz UV, permite alinear de manera sencilla un cuerpo opaco como lo es la muestra de silicio.

Obtener las mascarillas adecuadas, que cumplan con las características definidas en este trabajo, es un paso fundamental en el proceso de fabricación del dispositivo; la mascarilla correcta agiliza el proceso, permite obtener mejores resultados en la fabricación y determina el buen funcionamiento del dispositivo.

Trabajo a futuro.

El presente trabajo presenta múltiples oportunidades para su mejora desde el proceso de fabricación hasta la implementación del sensor.

Para la técnica de Micromaquinado aplicada podemos realizar mejoras en determinadas etapas del proceso de fabricación, en específico reducir la cantidad de partículas contaminantes en el aire durante el proceso de fotolitografía y mejorar el control de la temperatura y del tiempo de exposición para el ataque con KOH.

Si bien el análisis de desplazamiento del elemento sensitivo empleado en este trabajo es una buena aproximación, debemos encontrar un modelo matemático que permita analizar la estructura real (diafragma-Boss).

El empaquetamiento del dispositivo, el circuito de pre-amplificación y acondicionamiento de señal, así como el circuito de lectura son complementos que permitirán realizar mediciones reales de las diferentes presiones del cuerpo humano.

Bibliografía

- [1] M. E. Series, The MEMS Handbook-MEMS Introduction and Fundamentals, M. Gad-ed-Hak, Ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] R. A. L. Thomas M. Adams, Introductory MEMS Fabrication and Applications, Springer, 2010.
- [3] M. I. Younis, MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics, Springer, 2011.
- [4] G. PEI, A micro capacitive pressure sensor with two deformable electrodes: design, optimization and fabrication, Ph.D. dissertation, Department of electrical and computer engineering, National University of Singapore, 2006.
- [5] L. K. Baxter, «www.capsense.com,» 20 7 2000. [En línea]. Available: <http://www.capsense.com/capsense-wp.pdf>.
- [6] G. Hall, Tratado de fisiología médica, Elsevier Saunders, 2011.
- [7] C. M. M. Antonio López Farré, Libro de la salud cardiovascular del Hospital Clínico San Carlos y de la Fundación BBVA, Fundación BBVA, 2009.
- [8] D. M. A. G.-E. Académico Dr. Raúl Carrillo-Esper, «Presión Intraabdominal,» *Revista Mexicana de Anestesiología*, vol. Vol. 33, nº Sup1, pp. S175-S179, 2010.
- [9] Pfizer, «www.pfizer.es,» Pfizer, 2015. [En línea]. Available: https://www.pfizer.es/salud/cumple365/enfermedades/ofthalmologia/es_presion_intraocular.html#.
- [10] T. B. G. Sáez, «<http://www.hvn.es/>,» 2008. [En línea]. Available: http://www.hvn.es/servicios_asistenciales/ginecologia_y_obstetricia/ficheros/cr08.distocias_dinamicas.pdf.
- [11] R. B. D. B. H. L. B. F. B. A. V. P. David Arjona Villanueva, *Hipertensión intracraneal*, Hospital Virgen de la Salud, 2008.
- [12] K. J. V. S. G. Vijay K. Varadan, Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies, John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [13] P. P. P. Donald R. Askeland, Ciencia e ingeniería de los materiales, Thompson, 2004.
- [14] W. D. N. T. W. K. Matthew A. Hopcroft, «What is the Young's Modulus of Silicon?,» *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, vol. 19, nº 2, pp. 229-238, 2010.
- [15] K. K. N. S. M. Sze, Physics of Semiconductor devices, Wiley, 2007.

- [16] S. M. Sze, VLSI Technology, Mc Graw Hill, 1984.
- [17] B. S.-C. F. L.-H. L. A. C. A.L. Herrera-Maya, «Electromechanical analysis of a piezoresistive pressure microsensor for low-pressure biomedical applications,» *Revista mexicana de física*, vol. 1, nº 55, pp. 14-24, 2009.
- [18] V. Kempe, Inertial MEMS Principles and Practice, Cambridge University Press, 2011.
- [19] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications, Springer, 2004.
- [20] M. E. Series, MEMS Applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [21] J. A. Kubby, A Guide to Hands-on MEMS Design and Prototyping, Cambridge University Press, 2011.
- [22] R. G. B. Warren C. Young, Roark's Formulas for Stress and Strain, Mc Graw Hill, 2002.
- [23] J. K. N. Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Mc Graw Hill, 2008.
- [24] R. C. Jaeger, Introduction to Microelectronic Fabrication, Addison-Wesley, 1991.
- [25] S. A. Iniesta, *Micromaquinado*.
- [26] S. A. Iniesta, Estudio del efecto piezorresistivo en el canal de transistores MOS y su aplicación como elemento sensible a la presión en la construcción de dispositivos microelectromecánicos tipo sensores de presión, Disertación Ph.D., Departamento de Ingeniería Eléctrica Sección de Electrónica del Estado Solido, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN.
- [27] d. d. l. p. M. E. W. d. d. c. Jeanne Mager Stellman, «83 Microelectrónica y Semiconductores,» de *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*, Agustín de Bethencourt, 11 28003 Madrid, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Subdirección General de Publicaciones, 1998, pp. 83.1-83.42.
- [28] UDG, «proton.ucting.udg.mx,» [En línea]. Available: http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/micro_ingeneria/sumintro.html.

Anexo 1

Resumen de la técnica de Micromaquinado

Técnica de Micromaquinado.

La técnica de Micromaquinado empleada para la fabricación del sensor se resume en la siguiente lista mostrando cada uno de los pasos, además de las medidas y tiempos utilizados en cada etapa.

I. Pasos para la elaboración de mascarillas.

1. Diseñar mascarillas de acuerdo a las características del dispositivo a fabricar, utilizando las ecuaciones antes descritas.
2. Dibujar las mascarillas mediante un software de dibujo, con una resolución igual o mayor a 1200ppp.
3. Imprimir las mascarillas mediante impresora láser de por lo menos 1200ppp de resolución o mediante fotomecánica.
4. Alinear mascarillas en la estructura de aluminio, fijarlas y colocar un tope para alinear y descansar la muestra.

II. Pasos para la limpieza de muestras.

1. En un vaso colocar 30ml de H_2SO_4 , agregar 10ml de H_2O_2 .
2. Sumergir muestras en solución Piraña, colocar en tina ultrasónica por 10min.
3. Enjuagar muestras con agua desionizada (DI), primero sumergir en agua y después realizar enjuague a presión.
4. Secar muestras (utilizar papel para eliminar exceso de agua y secadora para el cabello para eliminar remanentes).
5. Sumergir muestras por 5min en solución Piraña, utilizar tina ultrasónica.
6. Repetir pasos 3 y 4.
7. Sumergir muestras en ácido fluorhídrico (HF) durante 3-5 segundos.
8. Repetir pasos 3 y 4.
9. Sumergir muestras en acetona y colocar en tina ultrasónica por 4min.
10. Sumergir en alcohol.
11. Repetir paso 4.
12. Meter en horno controlado a $120^{\circ}C - 130^{\circ}C$ por 20min.

III. Pasos para el proceso de Fotolitografía.

1. Colocar la muestra en spiner y sujetarla mediante vacío.
2. Revisar sujeción activando durante 4 segundos el spiner a aproximadamente 2000 rpm.
3. Colocar 4 gotas de resina positiva y esparcirla sobre la muestra evitando los bordes.
4. Activar spiner por 24 segundos.

5. Revisar en microscopio, buscando aglomeraciones en los bordes o zonas sin cubrir por la resina.
6. Realizar precocido por 8 minutos a una temperatura de entre 80 y 90 °C.
7. Repetir pasos 1, 2, 3, 4 y 5 para la otra cara de la muestra.
8. Realizar precocido por 16 minutos entre 80-90 °C.
9. Este paso se realiza en caso de que la resina no se deposite correctamente en toda la superficie de la muestra, se elimina la resina con 4 baños de acetona durante 5 minutos cada uno en tina ultrasónica y se seca en horno durante 20 minutos a una temperatura de entre 120 y 130 °C.
10. Se alinea la muestra entre las mascarillas y se fija al bastidor de aluminio mediante imanes.
11. Dejar encendidos los focos de luz UV durante 4 minutos antes de exponer.
12. Colocar el bastidor en fondo negro y exponer durante 6 minutos por cara.
13. Mezclar 7.5ml de $NaOH$ al 10% y 92.5ml de agua desionizada.
14. Sumergir muestras durante 5 segundos.
15. Enjuagar y revisar en microscopio el avance del revelado.
16. Repetir pasos 14 y 15 hasta observar el óxido de silicio en las ventanas abiertas de la resina.
17. Recocer muestras en horno a una temperatura de entre 120 y 130 °C durante 20 minutos.
18. Si la resina se diluye en algunas zonas no deseadas se puede retocar manualmente con resina las zonas descubiertas.

IV. Pasos para la apertura de ventanas en el SiO_2 .

1. Disolver 45grs de NH_4F en 75ml de agua DI en tina ultrasónica entre 3 y 5 minutos.
2. Agregar 21ml de HF al 10%.
3. Sumergir muestras en la solución durante 2min, y moverlas periódicamente.
4. Enjuagar muestras con agua desionizada (DI), primero sumergir en agua y después realizar enjuague a presión.
5. Secar muestras (utilizar papel para eliminar exceso de agua y secadora para el cabello para eliminar remanentes).
6. Revisar en microscopio el avance del óxido.
7. Realizar recocido de la muestra en horno controlado entre 120°C – 130°C durante 4min.
8. Repetir pasos 3-7 hasta poder observar el silicio en las ventanas. Esto se alcanza, aproximadamente, entre los 15 y 20 minutos de exposición al Buffer.
9. Remover la resina de las muestras realizando 4 baños con acetona en tina ultrasónica durante 5min cada uno.
10. Repetir pasos 4 y 5.
11. Secar muestras en horno controlado a 120°C – 130°C durante 20min.

12. Este paso se realiza una vez maquinada la estructura sensitiva: proteger el bastidor con resina aplicándola manualmente y eliminar el óxido de silicio del Boss por los dos lados utilizando solución buffer, sumergir 2 minutos, secar, revisar avance y recocer por 4 minutos (pasos 3-7). Repetir hasta eliminar el óxido.

V. Pasos para el ataque con *KOH*.

1. Realizar los cálculos de tiempos para la exposición de las muestras al atacante, para una temperatura a de 72°C y una concentración de *KOH* al 40%.
2. Diluir 69.405gr de *KOH* en 50ml de agua *DI* utilizando tina ultrasónica.
3. Comprobar la concentración de la solución pesando 50ml, la medición debe de dar 69.405gr.
4. Sumergir muestras en solución, mediante el proceso explicado anteriormente, a una temperatura de entre 72°C y 75°C . Mover periódicamente la solución.
5. Enjuagar muestras con agua desionizada (*DI*), primero sumergir en agua y después realizar enjuague a presión.
6. Secar muestras (utilizar papel para eliminar exceso de agua y secadora para eliminar remanentes).
7. Secar muestras en horno controlado a 120°C – 130°C por 20min.

Anexo 2

Procesos involucrados en la fabricación de MEMS mediante la técnica de Micromaquinado.

A continuación se describe los procesos involucrados en la fabricación de la estructura sensitiva, [27].

Mascarillas.

El diseño de las mascarillas es una parte fundamental en la fabricación de dispositivos, su diseño debe de considerar diferentes factores que van desde el maquinado de la estructura hasta la implementación del dispositivo final.

Ecuaciones para la definición de las ventanas.

El silicio bajo ataque anisotrópico, reacciona más rápidamente en los planos de orientación cristalina (110) y (100) que en los planos (111) y con mucho menor intensidad al óxido de silicio; el cual sirve de enmascarante. Las paredes del plano de orientación (111), forman un ángulo de 54.74° con respecto al plano (100) de la superficie, gracias a esta característica podemos elaborar diversas estructuras, [25], [26].

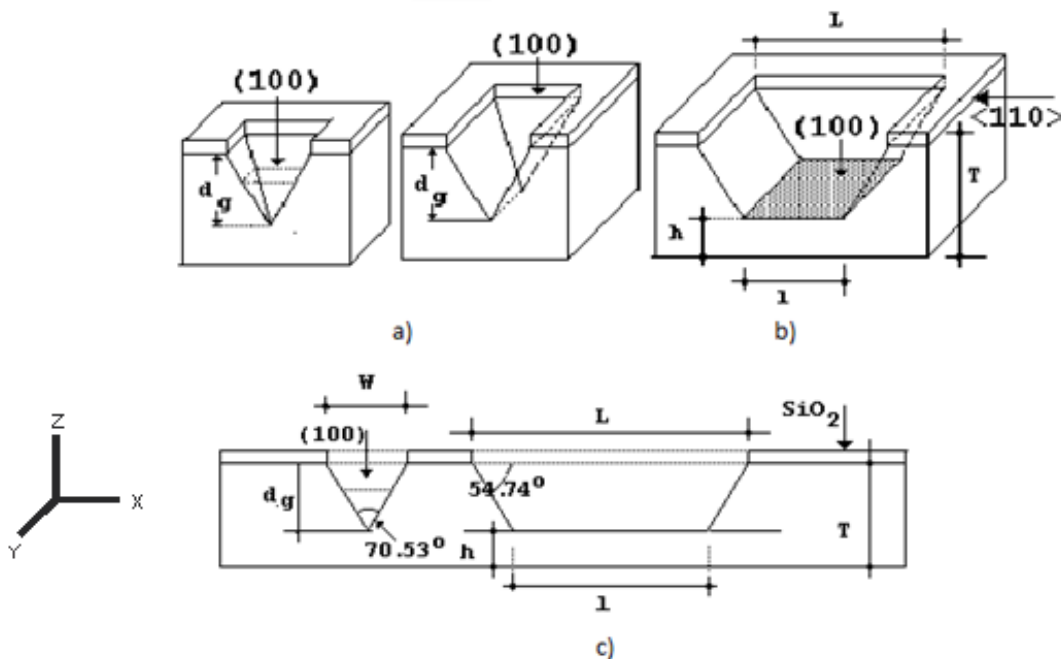


Figura A2.1 Estructuras posibles en el silicio bajo ataque anisotrópico: a) V o pirámide invertida; b) Diafragma o prisma trapezoidal; c) vista transversal tipo pirámide y diafragma. Colocar referencia de la imagen.

Para ataques en forma de V o de pirámide invertida, es posible calcular sus dimensiones a través de la ecuación siguiente.

$$d_g = \frac{W}{2} \tan 54.74^\circ$$

Dónde:

- d_g es la distancia de la superficie al vértice.
- W es el ancho de la ventana.
- $\tan 54.74^\circ = \sqrt{2}$.

Para estructuras tipo diafragma o de prisma trapezoidal, tenemos la siguiente expresión:

$$L = l + (T - h)\sqrt{2}$$

Dónde:

- l es el ancho del diafragma.
- T es el espesor de la oblea de silicio.
- h es el espesor del diafragma.
- L es el ancho de la ventana.

Diseño de mascarillas.

Utilizando las ecuaciones anteriores podemos calcular las dimensiones de diversas estructuras micromecánicas como diafragmas, grabados profundos y estrechos, trampolines, puentes resonadores, microbombas, entre otros. En caso del ataque en V , si es lo suficientemente prolongado y la ventana (W) sea lo suficientemente grande, se puede llegar a la otra cara de la muestra generando orificios. Es con estas dimensiones que se puede elaborar las mascarillas que se emplearán para la fabricación de las microestructuras.

De acuerdo a las arquitecturas planteadas, se calculan las dimensiones para cada una de las mascarillas necesarias. Las mascarillas generadas en espejo se utilizan para realizar ataques en las dos caras de la muestra.

Impresión de las mascarillas - Fotomecánica.

La fotomecánica es el proceso de transportación de la imagen a una película fotosensible mediante un proceso donde se expone, se revela, se fija y se lava, obteniendo la separación de colores que se transfiere hacia una plancha litográfica que puede ser metálica o de poliéster (fotolito). Mediante esta técnica se obtienen transparencias negativas o positivas de dibujos, fotografías y textos. La

fotomecánica es el método de impresión de mascarillas que tiene mejores resultados.

Limpieza de las muestras.

Durante el proceso de fabricación de dispositivos se busca, en la medida de lo posible, mantener las muestras (material semiconductor) libre de elementos que puedan afectar sus características y comportamiento, pues puede afectar el resultado final y hacer que nuestro dispositivo no se comporte de la manera deseada. Para mantener la superficie libre de partículas, contaminantes o restos de soluciones, es necesario realizar limpiezas constantes. La limpieza química remueve partículas de materia, rastros de impurezas orgánicas, iónicas y metálicas en las superficies de las obleas. Los métodos de limpieza más comunes son:

- Enjuague con agua desionizada
- Lavado con agua desionizada y detergente
- Disolventes: alcohol isopropílico (*IPA*), acetona, etanol, terpenos
- Ácidos: fluorhídrico (*HF*), sulfúrico (H_2SO_4) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), clorhídrico (*HCl*), nítrico (HNO_3) y mezclas
- Cáusticos: hidróxido de amonio (NH_4OH)

Durante el proceso de limpieza de obleas y fabricación de dispositivos, el uso de agua desionizada (*DI*) es muy importante; esta agua es tratada para eliminar cualquier rastro de contaminación iónica, de partículas y bacteriológica.

Fotolitografía.

La fotolitografía (litografía o enmascaramiento) es el método usado para grabar los patrones deseados en muestras que están recubiertas con un polímero protector basado en disolvente denominado resina fotosensible o fotoresina. Este polímero es afectado por la radiación que incide sobre él, ocasionando cambios en la solubilidad que presente en un revelador. La resina se clasifica en negativa o positiva, de acuerdo a si su solubilidad en el revelador disminuye (resina negativa) o aumenta (resina positiva) con la exposición a la radiación de luz UV.

Cuando la luz UV incide en resina positiva, esta se debilita en las zonas donde es alcanzada por la luz mientras que en las zonas protegidas por la mascarilla (zonas donde está la tinta) no se ve afectada. Cuando la muestra es revelada, la resina se disuelve exactamente en las zonas donde le incidió luz UV. Lo contrario pasa cuando se usa resina negativa, las zonas donde incidió luz no se ven afectadas por el revelador. Debido a que la resina es sensible a la luz ultravioleta (UV), el área de trabajo debe ser iluminado con luces de protección amarillas que no emiten las longitudes de onda UV.

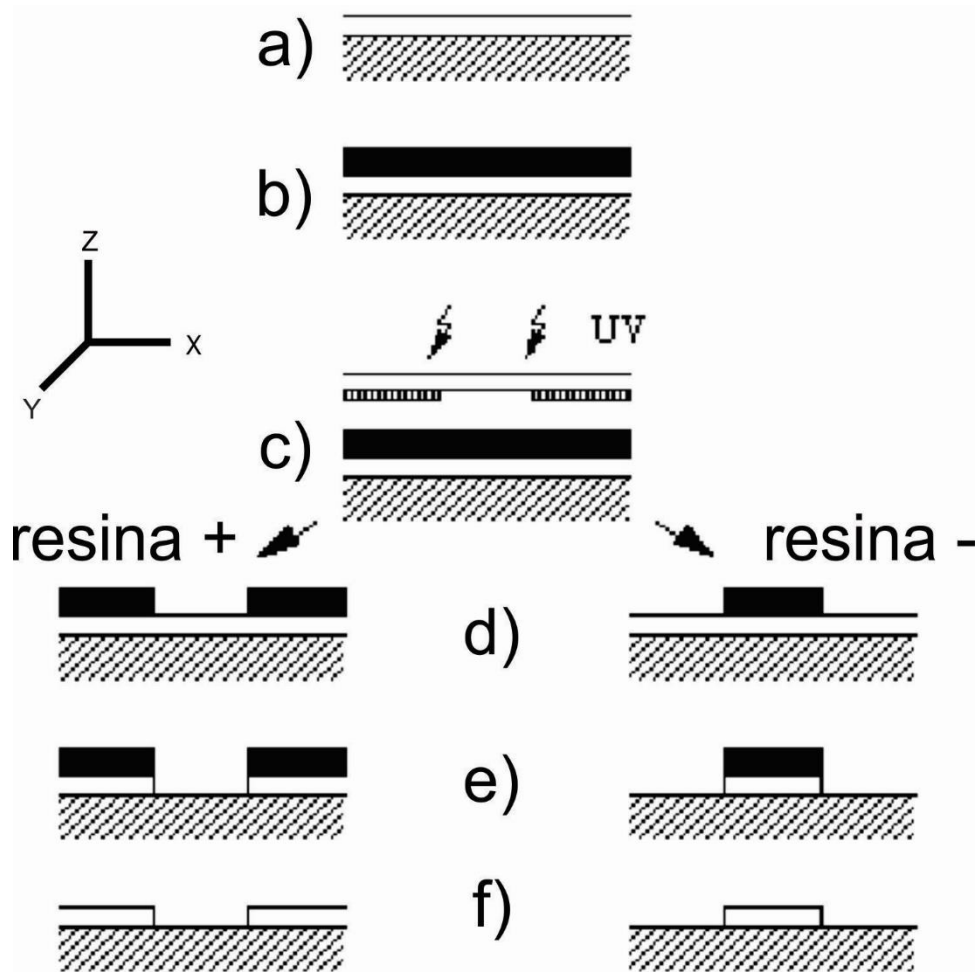


Figura A2.2 Diferencia entre la Resina+ y la Resina- : a) oblea de silicio con óxido en la superficie; b) se deposita resina en la muestra; c) se graba el patrón de la mascarilla mediante luz UV; d) la resina+ se debilita donde incidió luz, la resina- se debilita en donde no le incidió luz; e) una vez abiertas las ventanas se puede remover el óxido de silicio; f) se elimina la resina y queda grabado el patrón en el óxido, [28].

Apertura de ventanas en el SiO_2 .

Los ataques químicos en forma líquida o gaseosa se usan para remover material (por ejemplo el SiO_2) que no esté protegido por la resina endurecida durante el recocido. Los químicos se escogen dependiendo de cuál sea el material por atacar, la selectividad en este paso es necesaria para que el ataque remueva el material mucho más rápido de lo que ataca a la resina. Comúnmente para abrir las ventanas en el óxido de silicio se utiliza una solución de fluoruro de amonio (NH_4F), ácido fluorhídrico (HF) y agua DI denominada Buffer, esta solución tiene preferencia para atacar al SiO_2 que al silicio debido a que el primero es un material hidrofílico mientras que el segundo es un material hidrofóbico.

Ataque con *KOH*.

Mediante determinadas técnicas podemos transferir patrones en películas delgadas que hayan sido depositadas sobre una oblea de silicio para producir estructuras su superficie (maquinado de superficie), también podemos elaborar estructuras a partir de la oblea de silicio, utilizando el mismo sustrato como material de trabajo (maquinado de volumen). Las estructuras elaboradas en los sustratos de silicio se pueden obtener mediante dos tipos de grabados o ataques químicos, el grabado húmedo y el grabado seco. El grabado seco utiliza gases reactivos (plasma) en condiciones de vacío en una cámara de alta energía, esta técnica de maquinado tiene grandes ventajas sobre el ataque húmedo debido a que el control del ataque es mucho mayor, reduce los niveles de contaminación, y las estructuras no tienen las características de los ataques húmedos anisotrópicos e isotrópicos.

El ataque húmedo se caracteriza porque la muestra es sumergida en su totalidad en una solución atacante térmicamente controlada, hay dos tipos de ataque: isotrópico y anisotrópico. El primero ataca al silicio en todas direcciones y a la misma velocidad sin importar las orientaciones cristalográficas del silicio, mientras que el segundo ataca a diferentes velocidades en diferentes direcciones de acuerdo a las orientaciones cristalográficas del silicio. El atacante utilizado es una solución de hidróxido de potasio (*KOH*) y agua *DI*, esta solución ataca al silicio de manera anisotrópica, a determinada velocidad dependiendo de su concentración y de la temperatura a la que se lleve.

Razón de ataque - *Si* y *SiO₂*.

La velocidad de ataque en el silicio y en el óxido de silicio se puede encontrar en diferentes fuentes (Figura A2.3), al ser dependiente de la temperatura es importante mantener un control de la temperatura durante el ataque para lograr la estructura deseada. El tiempo de exposición de la muestra en el atacante se obtiene a partir de la velocidad de ataque y de las dimensiones de la estructura; dependiendo de la profundidad que se desee alcanzar en el sustrato es la cantidad de material que se debe atacar. Tomando esto en cuenta se obtienen los tiempos de ataque.

Para saber el tiempo necesario de exposición de nuestra muestra en *KOH* para obtener la estructura deseada, es necesario conocer las velocidades de ataque de acuerdo a las orientaciones del silicio para diferentes temperaturas y concentraciones.