



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FABRICACIÓN DE UN ESPEJO DEFORMABLE
UTILIZANDO UNA MEMBRANA DE POLÍMERO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

PRESENTA

IVÁN GÓMEZ ARISTA

TUTOR

DR. NASER QURESHI



2012

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oleg Viktorovich Kolokoltsev Filatov

Secretario: Dra. Laura Oropeza Ramos

Vocal: Dr. Naser Qureshi

1^{er}. Suplente: Dr. Maximino Avendaño Alejo

2^{do}. Suplente: Dr. Jesús Garduño Mejía

Sitio donde se realizó la tesis:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) - UNAM

Tutor de Tesis:

Dr. Qureshi Naser

Firma

A Esther Arista Sánchez y Omar Gómez Molina, por su amor.

A Abraham Luna por inducirme a este modus vivendi
y a Omar Gómez Arista por soportarme.

...y claro, también a Claus, Diego, Erik y Ricardo por su amistad.

Agradecimientos a:

Dr. Naser Qureshi.

Dr. Oleg V. Kolokoltsev Filatov.

Dra. Laura Oropeza Ramos.

Dr. Maximino Avendaño Alejo.

Dr. Jesús Garduño Mejía.

M.I. Guillermo López Maldonado.

Dr. Cesar Leonardo Ordoñez Romero.

Ing. Hesiquio Hernández Vargas.

M.I. Ricardo Arturo Vázquez Robledo.

Por su apoyo a la realización de la presente tesis.

Resumen

La presente tesis reporta resultados experimentales de la deformación de tres diferentes espejos deformables por campo eléctrico, los cuales fueron fabricados bajo un novedoso método que utiliza polímero (SU8 2002) como membrana. Utilizamos el polímero SU8 2002 porque ofrece módulos de elasticidad de ~ 2 GPa, el cual es menor en comparación con membranas elaboradas de nitruro de silicio (módulos de ~ 260 GPa) componente que utilizan varios fabricantes de espejos deformables. Nuestro trabajo se basó en una propuesta de espejo deformable desarrollado por D. L. Dickensheets[4], el cual emplea el método de micromaquinado en silicio utilizando técnicas convencionales de fotolitografía, depósito de metales, etc.

Abstract

This thesis reports experimental results of three different strain electric field deformable mirrors, which were manufactured under a novel method using polymer (SU8 2002) as a membrane. We used the polymer SU8 2002 as it provides modulus of elasticity about 2 GPa, which is lower compared membrane made of silicon nitride (modulus of elasticity 260 GPa) component manufacturers that use multiple deformable mirrors. Our work is based on deformable mirror a proposal developed by D. L. Dickensheets[4] which method used in silicon micromachining using conventional techniques photolithography, metal deposition, and so on.

Motivación

La óptica adaptativa (AO) es un campo multidisciplinario que abarca la física, la química, la electrónica y la informática. Su propósito es remover la distorsión y proporcionar imágenes limitadas por difracción. Los espejos deformables son elementos versátiles en la óptica adaptativa y típicamente proveen un control en el frente de onda.

Sus aplicaciones se empezaron a mostrar en diferentes campos del conocimiento, como en la Astronomía (desde 1953), cuando el astrónomo Horace W. Babcock propuso un método para compensar las aberraciones atmosféricas en el camino óptico de los telescopios. Propuso colocar una navaja rotatoria frente a un orticonoscopio como sensor de frente de onda y un espejo recubierto de una capa delgada de aceite como elemento óptico deformable. La idea estaba mucho más adelantada a la tecnología y tomó décadas desarrollar sensores de frente de onda y espejos deformables prácticos [15].

En recientes años el estudio del ojo humano también ha sido beneficiado de la AO. El ojo exhibe aberraciones variables en el tiempo degradando imágenes en la retina. El uso de AO en oftalmología se ha dedicado al estudio de la imagen de la retina y en el impacto de las aberraciones en la visión. En la primera aplicación, casi todas las modalidades existentes en oftalmología han incorporado a la AO para mejorar la calidad y resolución de las imágenes de la retina: saturación lumínica del fondo de imagen, oftalmoscopia por escaneo láser y más recientemente, la tomografía óptica coherente (OTC) oftálmica[3].

Por otra parte, desde la aparición del Láser se ha mantenido el interés en la búsqueda de generar pulsos ultracortos en el rango de picosegundos y femtosegundos, pero, solo en los años recientes se han tenido progresos espectaculares porque hasta ahora tenemos herramientas de diagnóstico y componentes disponibles para la modulación

de fase que permiten programar los pulsos.[7, 18].

El primer reporte de espejos deformables en la formación de pulsos, fue el espejo usado para hacer una modulación de fase cúbica. Actualmente son revisadas nuevas líneas de investigación y aplicaciones en las comunicaciones ópticas, amplificadores de alta potencia, control cuántico, entre otras[19].

Justificación

En los últimos veinte años, la tecnología de la microelectrónica ha sido utilizada para la fabricación de diseños mecánicos en semiconductores. El micromaquinado es un nuevo enfoque de construcción de sensores y otras estructuras con dimensiones en la escala de micrómetros ($10^{-6}m$), los cuales se basan en los procesos de desarrollo tecnológico de la industria de microelectrónica.

Combinando las tecnologías antes mencionadas en procesos particulares, se desarrollan pasos para grabar surcos en el interior de los semiconductores, así como vigas de dimensiones de micrómetros, puentes o membranas [16]. En el presente documento se expone la metodología para la elaboración de un espejo deformable por campo eléctrico utilizando un polímero (SU8 2002). Dicho polímero se está empezando a utilizar en desarrollos de micromaquinado porque ofrece un bajo módulo de Young, el cual, es ideal para la fabricación de micro/nano estructuras como cantilever, membranas y micro-canales [13].

El desarrollo del espejo deformable nos incorporará en múltiples aplicaciones en diferentes áreas industriales y científicas, también conoceremos diferentes líneas de investigación referente a materiales y procesos de microfabricación.

Objetivo

Desarrollar una metodología para elaborar un espejo deformable de membrana de polímero controlado por campo eléctrico.

Índice general

Índice general	1
1 Introducción	3
2 Conceptos básicos para la fabricación de un espejo deformable utilizando una membrana de polímero	5
2.1 Propiedades mecánicas del silicio	5
2.2 Micromaquinado	7
2.2.1 Depósito	8
2.2.2 Fotolitografía	10
2.2.3 Grabado de patrones en silicio	11
2.2.4 Grabado en volumen anisótropo en silicio	11
2.2.5 Ataques anisótropos	13
2.3 Infraestructura para la fabricación de espejos deformables utilizando membranas de polímero	14
2.3.1 Cuarto limpio	14
2.3.2 Sistema de fotolitografía	17
2.3.3 Sistema de depósito	19
2.4 Antecedentes de estructuras de espejos deformables	21
3 Micromaquinado y ensamble del espejo deformable por campo eléctrico utilizando una membrana de polímero	23

3.1	Fabricación del espejo deformable utilizando una membrana de polímero con recubrimiento reflejante	24
3.1.1	Metodología 1	24
3.1.2	Metodología 2	30
3.1.3	Metodología 3	35
3.1.4	Ensamble del espejo deformable por campo eléctrico	40
3.1.5	Acondicionamiento de señal eléctrica para el espejo deformable por campo eléctrico	43
3.2	Interferómetro de Michelson para la caracterización del espejo deformable	45
4	Resultados y análisis del espejo deformable por campo eléctrico	49
4.1	Resultados de deformación	49
4.1.1	Espejo deformable de multicapas como parte dinámica (cromo-polímero-aluminio)	50
4.1.2	Espejo deformable con parte dinámica de 2 μm de polímero y 100 nm de aluminio	53
4.1.3	Espejo deformable con parte dinámica de 4 μm de polímero y 20 nm de aluminio	55
4.2	Análisis de deformación	59
4.2.1	Análisis de fuerza electrostática del actuador	60
4.2.2	Análisis de deformación	62
4.2.3	Comparación con otros fabricantes	67
5	Conclusión	70
5.1	Trabajo a futuro	71
	Bibliografía	72

Capítulo 1

Introducción

Existe una gran variedad de espejos deformables que utilizan como actuadores el campo eléctrico, los cuales necesitan como region dinámica una membrana para tener el control sobre el frente de onda. Algunos microespejos deformables se fabrican con dos procesos importantes en cuanto a microfabricación: el micromaquinado en volumen y el micromaquinado en superficie. La microfabricación consiste en utilizar diferentes técnicas como fotolitografía, depósito de metales y grabado en silicio.

En nuestro caso, una de las razones por la que utilizamos el micromaquinado en silicio, es para obtener superficies suficientemente planas en la parte dinámica del espejo deformable. En el Capítulo 2, explicamos algunas características de las técnicas empleadas para fabricar los espejos deformables mostrados en la presente tesis.

En el mismo capítulo mostramos algunos espejos deformables comerciales y de investigación, además, mencionamos algunas propiedades del material y equipo que se utiliza para desarrollar el micromaquinado de nuestros espejos deformables.

En el capítulo 3 mostramos la metodología utilizada para fabricar los espejos, considerando algunos pasos clave para obtener variaciones en su manufactura, estos pasos nos ayudaron a obtener una mejor deformación de acuerdo a la distancia e intensidad de campo eléctrico.

También, mostramos cómo armamos el espejo deformable para obtener características de comportamiento del espejo ante cambios de distancia entre la parte dinámica del espejo y un electrodo. Las mediciones fueron realizadas con un Interferómetro de Michelson, el cual, fue armado para caracterizar los diferentes espejos que fabricamos.

Por último, en el capítulo 4 mostramos los resultados de las deformaciones y analizamos el comportamiento de nuestros espejos deformables con respecto a otros espejos comerciales y de investigación, así, determinamos la funcionalidad del espejo de acuerdo al método de fabricación.

Capítulo 2

Conceptos básicos para la fabricación de un espejo deformable utilizando una membrana de polímero

El proceso que se utilizó para la fabricación de nuestro espejo deformable básicamente se conoce como micromaquinado. El micromaquinado que realizamos fue sobre cristal de silicio, por lo cual, en este Capítulo hablaremos un poco acerca del micromaquinado, propiedades del silicio y el equipo que utilizamos para fabricar nuestro espejo deformable.

Al final, mostramos algunos parámetros de espejos deformables comerciales y otros desarrollados por institutos de investigación.

2.1. Propiedades mecánicas del silicio

El cristal de silicio está compuesto de átomos formados en estructura de diamante, la estructura es cúbica centrada en la cara (FCC, por sus siglas en Inglés), la Figura 2.1 nos muestra los átomos de la red de silicio y algunos planos cristalográficos. Es importante considerar la orientación cristalina del silicio porque tiende a partirse a lo

largo de los planos cristalográficos del cristal.

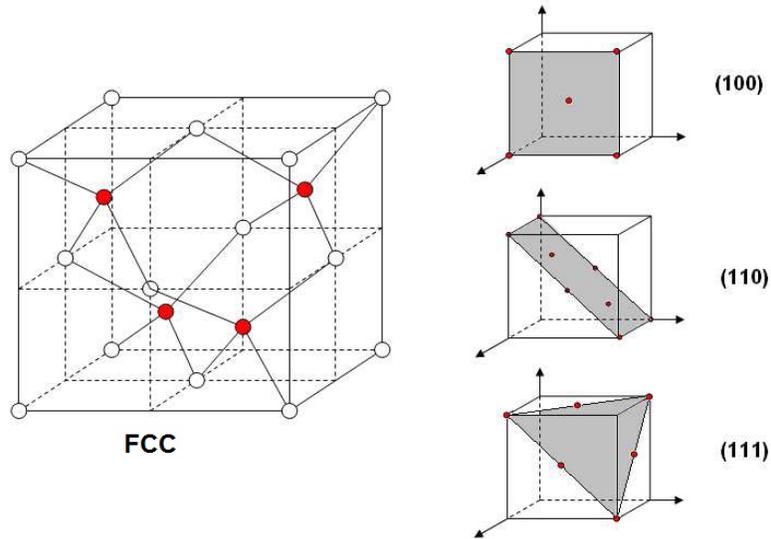


Figura 2.1 Estructura FCC del cristal de silicio.

Por otra parte, algunas propiedades mecánicas del silicio se muestran en la Tabla 2.1. Cabe mencionar que el cristal de silicio tiene un límite de elasticidad de 2.8 - 6.8 GPa el cual es mayor en comparación al del acero inoxidable que tiene 0.5 - 1.5 GPa. El módulo de Young del silicio es de 190 GPa para orientaciones 111, éste es cercano a la del acero que tiene de 206 a 235 GPa. Sin embargo, el silicio tiene una densidad de $2.32 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ que es muy cercana a la del aluminio que tiene $2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, pero, es un tercio de la densidad del acero inoxidable ($7.9 - 8.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$). También el silicio tiene un coeficiente de expansión térmica de $2.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ que es al rededor de una quinta parte de la que tiene acero inoxidable ($17.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) [11][12].

Propiedad	Medición
Estructura cristalina	Diamante, 8 átomos/unidad celdas
Punto de Fusión	1415 °C
Expansión Térmica	$2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Densidad	$2.32 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$
Módulo de Young	129.5 - 190 GPa
limite de elasticidad	2.8 - 6.8 GPa
Conductividad Térmica	a 300 K, 1.56 W/cmK

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del cristal de silicio [11].

2.2. Micromaquinado

Un problema fundamental en la microfabricación, es el desarrollo adecuado de la secuencia de pasos (depósito, fotolitografía y ataque) para que quede definida la forma y la función deseada del dispositivo. Generalmente la tecnología de micromaquinado puede clasificarse en dos secciones[11]:

- Micromaquinado en volumen. Se basa en grabar (en tres dimensiones) las figuras deseadas dentro de los materiales. Los materiales que suelen utilizarse son el Si, Cuarzo, SiC, GaAs, InP y Ge; por la dependencia (anisótropo) o independencia (isótropo) de la orientación en el grabado. Para hacer el grabado se emplea atacantes líquidos o plasmas.
- Micromaquinado en superficie. El grabado es construido, capa por capa, sobre la superficie del substrato. En el micromaquinado en superficie las formas en los plano X y Y no dependen de la cristalografía del substrato, pero, los diseños en la superficie típicamente son más pequeños que el micromaquinado en volumen.

Las estructuras obtenidas utilizando técnicas de micromaquinado se pueden dividir en tres grupos:

1. Estáticas. Incluyen estructuras fijas en tres dimensiones, tales como cavidades, columnas, orificios circulares y conectores eléctricos en miniatura.
2. Dinámicas. Por ejemplo, diafragmas y membranas, micropuentes, vigas en voladizo y resonadores, su característica común es que requieren un desplazamiento controlado para conseguir la función deseada.
3. Cinemática. Incluyen Micromotores, muelles, microengranajes, etc.

En el micromaquinado, las películas pueden depositarse sobre el sustrato por medios físicos (evaporación, pulverización catódica, etc.) como químicos (crecimiento reactivo, depósito químico por vapor, depósito por plasma, etc.). El diseño de cada una de las capas depositadas se define mediante el proceso de litografía, el ataque de las películas pueden ser seco o húmedo según los compuestos reactivos sean gases o líquidos. A continuación, hablaremos de las técnicas de depósito, técnicas de grabado en silicio y litografía, que utilizamos para la construcción del espejo deformable.

2.2.1. Depósito

- *"Spin Coating"*. En este proceso, el material disolvente se vierte sobre el sustrato y después se rota a alta velocidad, el líquido se propaga en toda la superficie dejando una capa uniforme del material como se muestra en la Figura 2.1.1.



Figura 2.1.1 Proceso de Spin Coating.

- *Evaporación.* Dentro de una campana de vacío, las películas son depositadas desde una fuente caliente hasta el substrato (ver Figura 2.2). Los sistemas de evaporación consisten de una campana de vacío, bomba, sujetador de muestras, crisol y un obturador. Una muestra del material es puesta en el crisol, después se cierra la campana y se hace un vacío dentro de ella de entre 10^{-6} a 10^{-7} Torr. Por último, el crisol es calentado hasta evaporar el material y el grosor de la película se determina por el tiempo que el obturador está abierto.

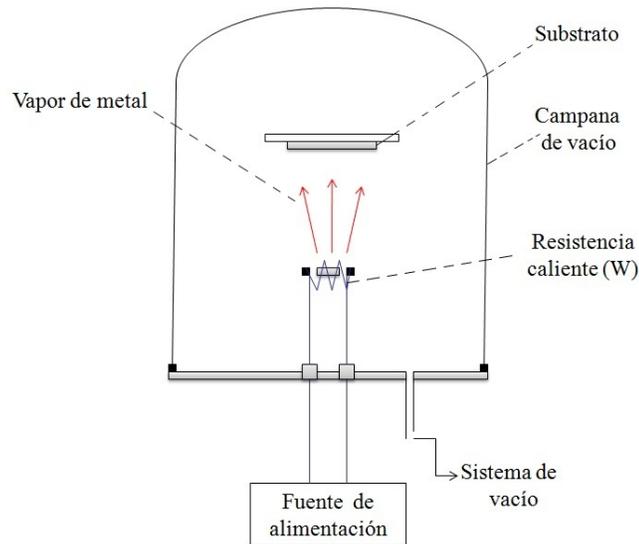


Figura 2.2 Proceso de Evaporación

El tiempo promedio de evaporación del material está en función de la presión del vapor del material, por lo tanto, materiales que tienen bajo punto de fusión (como el aluminio) son fáciles de evaporar, pero otros materiales (como el tungsteno) requieren altas temperaturas que causen la evaporación para que se deposite sobre la muestra.

Ya que el material evaporado se origina desde una fuente puntual, las películas evaporadas pueden ser no uniformes. Un segundo factor que afecta el recubrimiento es la movilidad de la muestra sobre el sustrato, en general, películas evaporadas son altamente desordenadas; en consecuencia, solo capas delgadas del material pueden ser depositadas por evaporación [11].

2.2.2. Fotolitografía

Los patrones en el grabado de cada capa se definen por una secuencia de pasos llamados fotolitografía, el cual comienza con la generación de una máscara con la geometría definida por regiones transparentes y opacas. Una capa delgada de un material fotosensible orgánico (fotorresina), es depositado sobre una oblea de silicio y una máscara cubre la película para ser definida. Después se expone la fotorresina junto con la máscara a una fuente de luz la cual atraviesa la máscara hasta la muestra, la imagen de la máscara es entonces transferida dentro de la fotorresina después de un revelado químico. El patrón de fotorresina, a su vez, actúa como una máscara resistente cuando subsecuentemente el material es procesado con tratamientos químicos, grabado con plasma u otros procesos apropiados.

Por último, la fotorresina es removida, dejando la capa con los patrones transferidos. Los pasos de la fotolitografía son repetidos para subsecuentes capas con las correspondientes máscaras. El ataque de las películas puede ser seco o húmedo, según las muestras reactivas sean gases o líquidos.

2.2.3. Grabado de patrones en silicio

Un requerimiento para el grabado de estructuras en silicio utilizando técnicas de fotolitografía, es el grabado de los patrones en el sustrato usando fotorresinas como máscara. El grabado de los patrones del diseño están acompañados por el ataque químico en las áreas de exposición del sustrato. Existen diferentes técnicas de grabado en silicio como: "*Wet Chemical Etching*" y "*Dry Etching*", etc. En esta sección describimos la primera debido a que es la que usamos para la fabricación del espejo deformable y también es la que podemos hacer en nuestro laboratorio.

- "*Wet Chemical Etching*". En el grabado húmedo, los patrones grabados en el sustrato utilizando máscaras de fotorresina u otro material; son inmersas en las soluciones por un específico tiempo. La solución de ataque solo remueve las áreas especificadas por la máscara y el perfil del grabado en el material depende de la cristalografía del sustrato. La lista de grabados húmedos es muy grande, en la sección 2.2.5 mencionamos algunos aspectos que conciernen a este tipo de grabado ya que es importante en nuestro proceso de fabricación del espejo deformable.

2.2.4. Grabado en volumen anisótropo en silicio

Se puede maquinarse el silicio con precisión mediante ataques anisótropos que graben selectivamente sobre los planos cristalográficos para definir la forma del sensor, creando estructuras en tres dimensiones. La mayor parte de estos ataques se basan en reacciones químicas en fase líquida. Una característica básica de los ataques anisótropos es que dependen fuertemente de la orientación cristalográfica; esto indica que la velocidad de ataque será función de la orientación cristalina de la oblea[11].

Cualitativamente, el ataque anisótropo depende de la densidad de átomos, de su distribución geométrica y de la energía necesaria para arrancar un átomo de la super-

ficie. En muchos casos es difícil determinar qué planos cristalográficos se atacarán con más rapidez, ya que la velocidad varía con el atacante utilizado y con las condiciones locales del ataque.

La geometría de las estructuras en tres dimensiones formadas depende de la propia forma de la máscara, para obtener la estructura deseada, sus bordes deben estar orientados correctamente, si no están bien alineados se producirá ataque bajo las esquinas cóncavas, también conocido como "*undercutting*" (ver Figura 2.3).

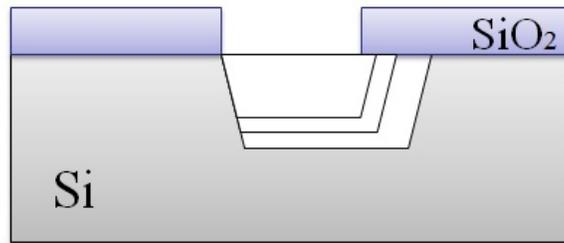


Figura 2.3 Ejemplo de "*undercutting*".

También, si el diseño incluye esquinas convexas, independientemente de las condiciones de alineamiento, el ataque se llevará a cabo por debajo de ellas. En la Tabla 2.2 se muestran algunos ejemplos de estructuras obtenidas mediante una correcta alineación de las máscaras sobre silicio con diferentes orientaciones:

Apertura	Orientación de la superficie	Estructura
Cuadrado	$\langle 100 \rangle$	Pozo piramidal o pirámide truncada
Rectángulo	$\langle 100 \rangle$	Pozo rectangular
Círculo	$\langle 100 \rangle$	Pozo piramidal
Arbitrario cerrado	$\langle 100 \rangle$	Pozo rectangular
Cuadrado o rectángulo	$\langle 110 \rangle$	Agujero con paredes verticales

Tabla 2.2. Ejemplos de estructuras obtenidas mediante ataques anisótropos.

2.2.5. Ataques anisótropos

Esta técnica se ha utilizado desde los años 60 utilizando soluciones alcalinas para atacar al silicio selectivamente de acuerdo a su orientación cristalina, las soluciones tienen tiempos de ataque y distinta selectividad dependiendo de su composición química y su temperatura. Comúnmente se utiliza el EDP (Etilen Diaminapirocatecol) que está formado por una mezcla de etilendiamina, pirocatecol y agua, que aumenta su velocidad de ataque y selectividad añadiendo una pequeña cantidad de piracina.

Otra solución muy utilizada es el hidróxido de potasio (KOH), su selectividad para atacar los planos $\langle 110 \rangle$ frente a los planos $\langle 111 \rangle$ puede ser mucho mayor que la del EDP. Para mejorar aún más la selectividad se añade frecuentemente alcohol isopropílico, sin embargo, con el KOH no puede utilizarse dióxido de silicio como máscara en ataques prolongados, ya que se ataca con mucha más rapidez que con el resto de disoluciones.

Existen otras soluciones fuertemente alcalinas, como el hidróxido de cesio, que ataca muy lentamente al óxido de silicio (SiO_2) y al tantalio, también hay soluciones de hidróxido de amonio, hidróxido de sodio, la hidracina (que no ataca al dióxido de silicio ni al aluminio), el hidróxido de tetrametilamonio (TMAH), entre otros.

La mayoría de estos atacantes no respetan a los metales, por lo que habrá que utilizar técnicas especiales de pasivación y protección; en particular, el EDP no ataca al oro, pero sí al aluminio, y el TMAH, que es muy selectivo frente al dióxido de silicio y al nitruro de silicio, también puede llegar a ser selectivo frente al aluminio si se prepara convenientemente. También existen atacantes formados por ácidos acético, fluorhídrico y nítrico, que no muestran dependencia con las orientaciones cristalográficas, en la Tabla 2.3 mostramos información sobre algunas soluciones químicas para grabar en metales o semiconductores.

Cabe mencionar que la fotorresina no suele ser apropiada para ser usada como

máscara, ya que no soporta los largos tiempos de ataque[11].

Solución de ataque	Materiales que ataca
Ácido Acético (H_3COOH)	GaAs; Pb; Ti
Ácido clorhídrico(HCl)	Al; Cr; Cu; Fe ₂ O ₃ ; Ga; GaAs; GaN; In; Fe; Pb; Ni; NiO, Ni ₂ O ₃ ; Sn; SnO ₂ ; Ti; Zn
Ácido fluorhídrico (HF)	GaAs; Ni; SiO ₂ ; Ti
Ácido nítrico (HNO_3)	C; Cu; GaAs; In; Fe; Pb; Ni; Ag; Pd; Pt; Sn; Ti; Zn; ZnO
Ácido fosfórico (H_3PO_4)	Al; Cu; GaAs; GaN; Fe; Ni; SiN; ZnO
Hidróxido de potasio (KOH)	Al; C; Cu; Ag; GaAs; Si; Ti
Hidróxido de sodio (NaOH)	Al; Cu; Ag; Ti; GaAs; GaN
Ácido sulfúrico (H_2SO_4)	C; Cu; GaAs; Fe; Pb; Ni; Ti
Agua regia ($3HCl : 1HNO_3$)	Todos los metales

Tabla 2.3. Soluciones químicas para grabado en metales o semiconductores [2].

2.3. Infraestructura para la fabricación de espejos deformables utilizando membranas de polímero

En esta sección hablaremos de la infraestructura que se utilizó para manufacturar los espejos deformables mostrados en esta tesis.

2.3.1. Cuarto limpio

En un área de trabajo, hay muchas fuentes de contaminación en el aire, como polvo y pequeños trozos de pelo, que, en comparación con los componentes en un sensor (que son menos de una micra de tamaño) parecen enormes rocas. Una sala especialmente diseñada para obtener bajos niveles de contaminación se le llama sala blanca, cuarto limpio, sala limpia o "clean room".

Algunos parámetros que suelen identificar a un área de trabajo como cuarto limpio son[8]:

- Número y dimensiones de partículas en el aire.
- Temperatura y distribución de la misma.
- Flujo de aire: velocidad y dirección, así como su distribución en la sala.
- Presión interior del aire y su distribución.
- Geometría y acabados interiores.
- Iluminación.
- Protección contra incendios.
- Protección electrostática.



Figura 2.4 Cuarto limpio ubicado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET).

A la fecha, el estándar internacional ISO 14644 describe la clasificación de cuartos limpios, pruebas y monitoreo requeridos, diseño y construcción de los mismos así como muchos otros detalles.

Estos parámetros se deben mantener alrededor de los valores estándar con tolerancias muy estrechas, sean cuales sean las, condiciones exteriores y el proceso que se realice en su interior. Los cuartos limpios se pueden clasificar en tres diferentes tipos dependiendo de su forma de operar[8], estos son:

- Por el grado de pureza del aire interior.
- Por el flujo de aire.
- Por el tamaño

La Figura 2.4 muestra el cuarto limpio que utilizamos para elaborar los espejos deformables, la forma en que opera nuestro cuarto limpio es por flujo de aire y de acuerdo a la norma ISO 14644 se estima que nuestro cuarto se diseñó para ser de Clase 1000, esto es, mantendría 35 300 partículas por metro cúbico, en donde el tamaño de la partícula es de $0.5 \mu\text{m}$. El cuarto cuenta con el siguiente equipo:

- Spin Coating
- Lámpara de luz ultravioleta
- Parrilla para calentar (hot plate)
- Campana de Química

Cabe mencionar que durante la realización de nuestro espejo deformable, el cuarto limpio se encontraba en remodelación, por lo que no operaba al 100 %, esto hay que tenerlo en cuenta en los resultados mostrados en el Capítulo 4.

2.3.2. Sistema de fotolitografía

Para fabricar nuestros espejos deformables utilizamos la fotorresina SU8 2002. A continuación describiremos el procedimiento estándar de fotolitografía (ver Apéndice A) y el equipo que utilizamos para ésta fotorresina.

Primero se deposita una capa de fotorresina sobre la muestra mediante "spin coating", el equipo que nosotros utilizamos se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Spin Coating del CCADET.

Después de que la fotorresina se ha depositado en el sustrato, debe ser cocida en un horno a 65 o 95 °C (o parrilla, ver Figura 2.5) para evaporar el solvente y densificar la película.



Figura 2.5 Parrillas para calentar hasta 250 °C.

Esta fotorresina al ser iluminada con algún tipo de luz característica se vuelve insoluble (resina negativa) o soluble (resina positiva), nosotros iluminamos la resina SU8 2002 con luz ultravioleta (de 350-400 nm)[13]; el equipo se muestra en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Lámpara de Ultravioleta.

Tras la exposición, se debe realizar un cocido a 65 o 90 °C (Post Expose Bake, PEB) para entrelazar a nivel molecular las partes expuestas de la película, a continuación la muestra se introduce en un revelador específico, de manera que se disuelven las zonas solubles (si las zonas que no han sido iluminadas se disuelven, la resina es negativa; si las zonas que sí han sido iluminadas se disuelven, la resina es positiva). El revelador se quita de la muestra introduciéndola en agua desionizada y secándola luego con una pistola de nitrógeno. En algunas ocasiones se realiza un cocido a una temperatura de aproximadamente 200 °C (Hard Bake) para aplicaciones donde la fotorresina es dejada como parte del dispositivo final[13]. Para los procesos químicos utilizamos la campana de química (ver Figura 2.7).



Figura 2.7 Campana de Química.

2.3.3. Sistema de depósito

El sistema de depósito con el que contamos, es un sistema por evaporación (ver Figura 2.8), el cual cuenta con los componentes básicos (ver sección 2.2.1). Con nuestro sistema de depósito de evaporación podemos alcanzar presiones hasta 10^{-6} Torr, y podemos alcanzar temperaturas de 1000°C , para ello, utilizamos una fuente de corriente de hasta 200 A con voltajes de hasta 6V. Estos parámetros son suficientes para realizar el depósito de los metales que utilizamos en la fabricación de espejo deformable por campo eléctrico (cromo y aluminio).

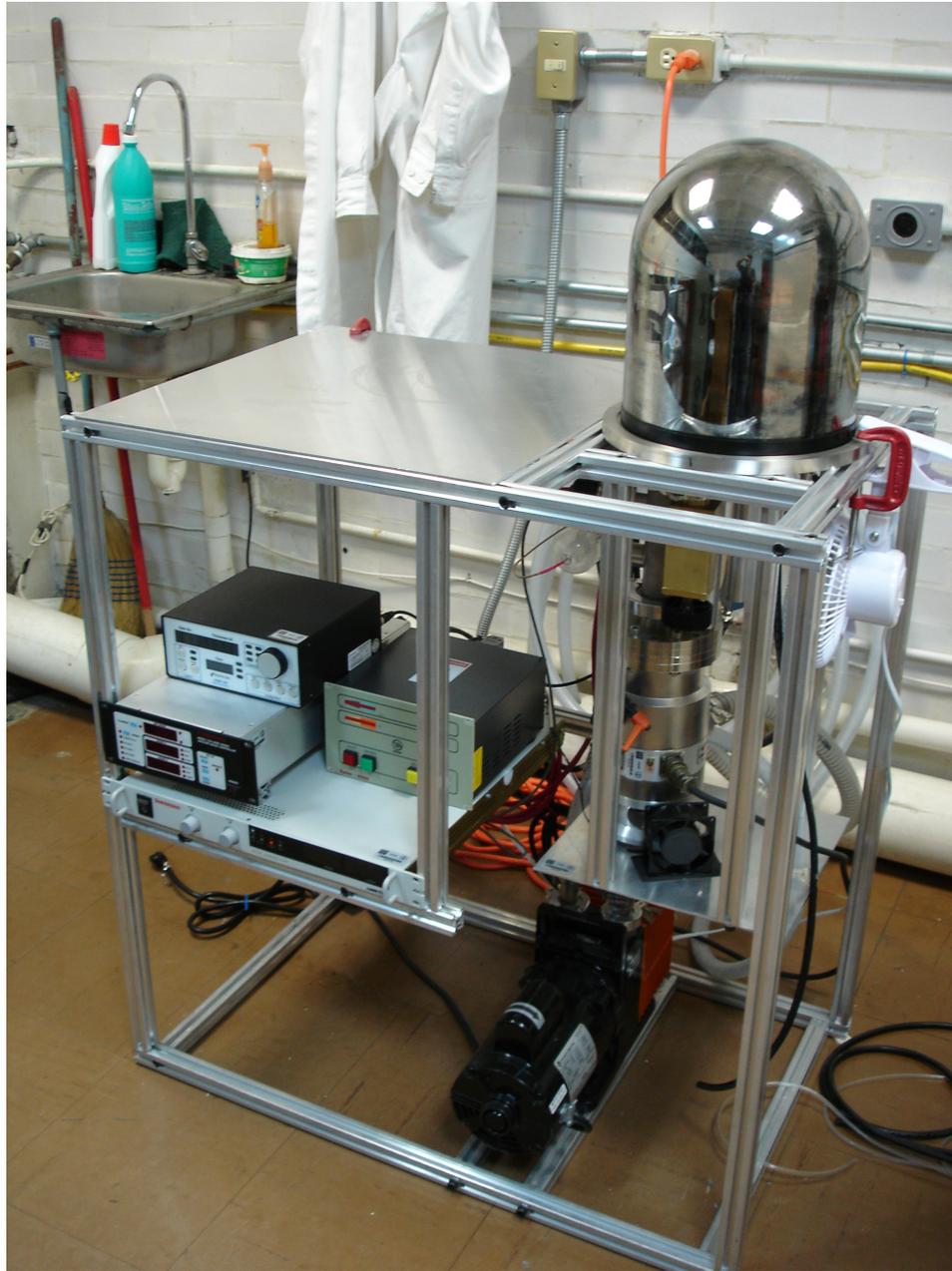


Figura 2.8 Sistema de depósito por evaporación en el CCADET.

2.4. Antecedentes de estructuras de espejos deformables

Los espejos deformables, son la tecnología principal para correcciones de frente de onda. En algunos casos, el perfil de la superficie de los espejos deformables está controlado por una matriz subyacente de actuadores que mueven la superficie hacia dentro o hacia afuera (del perfil de la superficie del espejo) en respuesta a un voltaje aplicado. El rango de frentes de onda que pueden ser corregidos por un espejo deformable está limitado por:

1. El actuador.
2. El tamaño del actuador.
3. El número de actuadores.
4. La distribución de los actuadores.
5. El modelo de control para las señales de los actuadores.

Las cuatro primeras son limitaciones físicas del espejo deformable, mientras que el último es una limitación del software de control.

Se han propuesto muchos arreglos de actuadores (cuadrado, triangular y hexagonal) y la mayoría de los espejos deformables se construyen con matrices de actuadores cuadrados, porque son fáciles de colocar en un sistema de coordenadas cartesianas y es más fácil el mapeo de las órdenes del detector cuadrado en los sensores de frente de onda. Para montar la matriz cuadrada en un espejo deformable circular, los actuadores de la esquina a veces se quitan [17].

La fabricación de espejos deformables está aprovechando los avances tecnológicos en los sistemas MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Por ejemplo, AgilOptics Inc., Intellite Inc. de Albuquerque N.M.[14], OKO Technologies [5], California Institute of Technology [9], etc. han producido espejos deformables de membrana electrostática utilizando la tecnología micromaquinado de membranas en silicio. Su

proceso de fabricación de espejos deformables comienza con una oblea de silicio recubierta de nitruro de silicio (en uno o en ambos lados, dependiendo del fabricante). El tamaño de la región dinámica del espejo es de acuerdo al procedimiento de micro-maquinado; una vez fabricada la membrana de nitruro de silicio, ésta es cubierta con aluminio u oro. Después, la estructura conductiva de la membrana es suspendida por encima de un arreglo de actuadores conductores (electrodos). Por último, un voltaje aplicado a los electrodos induce una fuerza electrostática que atrae a la superficie conductora, deformando la membrana.

El tamaño de los espejos que fabrican AgilOptics Inc. e Intellite Inc. de Albuquerque N.M.[14] están entre los 10 y 25 mm, aunque han fabricado espejos de hasta 125 mm. Algunos de sus espejos utilizan hasta 110 V simultáneamente en 37 electrodos de un espejo de 25 mm de diámetro. Sus espejos se pueden deformar desde menos de 1λ hasta 7λ , considerando $\lambda = 633\text{nm}$ [14].

El nitruro de silicio es un material con módulo de elasticidad 260 GPa, por lo que, diseños prácticos han sido limitados a carreras menores a $5\mu\text{m}$ (como máxima deflexión al centro de la membrana) para espejos de 1 mm de diámetro con un espacio entre actuador y membrana de $12\mu\text{m}$ y menos de 300 V por actuador [4].

Se han desarrollado espejos deformables utilizando polímero (SU8 2002) como membranas, el polímero SU8 2002 tiene un módulo de elasticidad de 2 GPa, al utilizarlo como región dinámica del espejo han obtenido una deflexión de hasta $5\mu\text{m}$ a 270 V en el centro de la membrana; donde la membrana mide 3mm^2 [4].

En la presente tesis se muestra un método alternativo para fabricar espejos deformables de membrana de polímero de SU8 y haremos unas comparaciones de deformación con membranas de otros fabricantes, la metodología es expuesta en el Capítulo 3 y los resultados se muestran en el Capítulo 4.

Capítulo 3

Micromaquinado y ensamble del espejo deformable por campo eléctrico utilizando una membrana de polímero

Para fabricar nuestro espejo deformable nos basamos en el diseño de David L. Dickensheets[4], él expone como fabricar espejos deformables utilizando SU8 2002.

En este capítulo describimos tres metodologías que utilizamos para fabricar la parte dinámica de los espejos deformables, para ello, tuvimos que adaptar procesos de fotolitografía y micromaquinado con respecto al equipo que tenemos. En éstas metodologías mostramos parámetros claves en el proceso de fabricación para obtener pequeñas variaciones en las características de los espejos sin comprometer su fabricación

También, mostramos como se ensambló cada espejo a un electrodo, que, junto con el espejo funciona como actuador electrostático. Al final del capítulo hablamos del instrumento (Interferómetro de Michelson) que se construyó para medir la deformación de cada uno de los espejos que fuimos elaborando.

3.1. Fabricación del espejo deformable utilizando una membrana de polímero con recubrimiento reflejante

La membrana es el parte fundamental de la fabricación de nuestros espejos deformables porque conforma la parte dinámica del espejo. A continuación describimos tres metodologías para fabricar la región dinámica de los espejos deformables expuestos en este trabajo, éstas metodologías se basan en procesos de litografía y micromaquinado expuestos en el Capítulo 2.

3.1.1. Metodología 1

Con esta metodología fabricamos un espejo deformable utilizando películas de cromo, polímero (SU8 2002) y aluminio como parte dinámica, los pasos son los siguientes:

1. *Preparación del substrato (Silicio)*. El substrato que se utilizó es silicio (Si), tiene orientación cristalina $\langle 110 \rangle$, está dopado de fósforo (D(P)) y su espesor es de $139.7 \mu\text{m}$. Para utilizarlo como substrato, primero cortamos la oblea de silicio en forma cuadrada de un $\sim 1 \text{ cm}^2$, para ello, se hace una muesca en un borde del silicio con un lápiz con punta de diamante, al presionar sobre la cara de la oblea, ésta se parte de acuerdo a su orientación cristalina. La Figura 3.1 inciso a), muestra el esquema de la oblea de silicio y como se hace el corte en ella, en el inciso b), se muestra las dimensiones del silicio que utilizaremos como substrato.

Para eliminar el polvo u otra sustancia adherida al silicio procedente de su manipulación durante el corte, se recomienda sumergir la oblea en acetona, después en alcohol isopropílico y por último se limpia con agua desionizada

y se seca con nitrógeno de alta pureza o aire comprimido para componentes electrónicos (sin químicos).

La limpieza del sustrato es un proceso muy importante, ya que cualquier resto de suciedad sobre su superficie produce una mala adherencia de las películas depositadas.

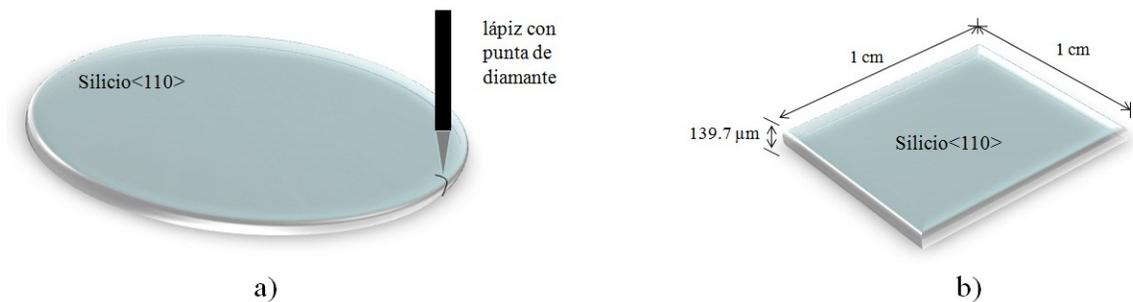


Figura 3.1 Inciso a) esquema del corte de oblea de silicio. Inciso b) esquema de las dimensiones del sustrato de silicio $\langle 110 \rangle$, D(P).

2. *Depósito de cromo.* Tras la limpieza del sustrato se aplica un recubrimiento de cromo depositado mediante el sistema de evaporación explicado en el Capítulo 2. Para éste depósito los parámetros son:

Presión	$1.8 \times 10^{-5} Torr$
Velocidad de Depósito	menor a 0.2 nm/s
Voltaje	3 V
Corriente	80 A

Tabla 3.1. Parámetros para el depósito de cromo para el espejo deformable.

Para que el cromo tenga mejor adherencia al silicio, la velocidad de depósito es menor a 0.2 nm/s. El espesor de cromo varía de acuerdo al propósito por el cual se va a aplicar en el espejo deformable, es decir, para el lado que se va a utilizar como máscara de ataque húmedo recomendamos depositar al menos

100 nm (ya que el KOH no ataca el cromo, ver Sección 2.2.3 del Capítulo 2) y para el lado en donde se utiliza como adhesivo para la fotorresina de SU8 2002, depositamos 50 nm. La Figura 3.2 nos muestra el esquema del sustrato de silicio con el depósito de cromo en ambas caras de la oblea.

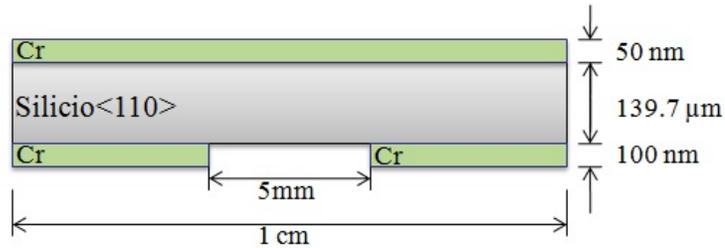


Figura 3.2 Esquema del sustrato de silicio con depósito de cromo en ambos lados del silicio.

El patrón de grabado de Cr en una de las caras del sustrato es una figura cuadrada de $\sim 5 \text{ mm}^2$, para hacerla, utilizamos como máscara una hoja de aluminio (con las dimensiones antes mencionadas) adherida al silicio con plastilina.

3. *Limpieza.* Nuevamente hacemos una limpieza con alcohol isopropílico, agua desionizada y después lo secamos, esto se hace porque el proceso de depósito de cromo es sucio y también así eliminamos la plastilina adherida al silicio.
4. *Cocido fuerte.* Para que no queden residuos de agua a nivel molecular, horneamos la muestra a $200 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 5 minutos en la parrilla (ver Figura 3.3).

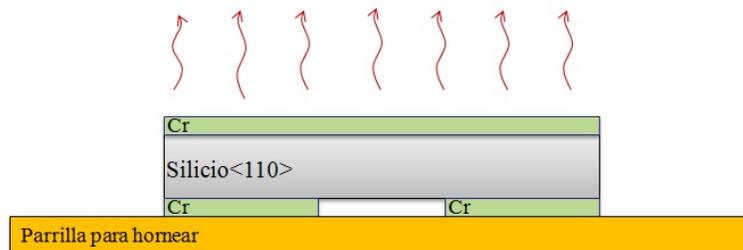


Figura 3.3 Esquema del cocido de la muestra, después de la limpieza del depósito de cromo.

5. *Spin coating*. De acuerdo con las especificaciones del fabricante de polímero SU8 2002 (ver Apéndice A), colocando una gota de éste polímero y rotando la muestra a 3000 rpm por 30 segundos, se deposita una película polímero de $\sim 2 \mu\text{m}$ de espesor sobre el substrato. Ésta película es depositada en el lado donde se tiene 50 nm de Cr, la Figura 3.4 nos muestra el esquema de la fabricación del espejo deformable hasta éste paso.

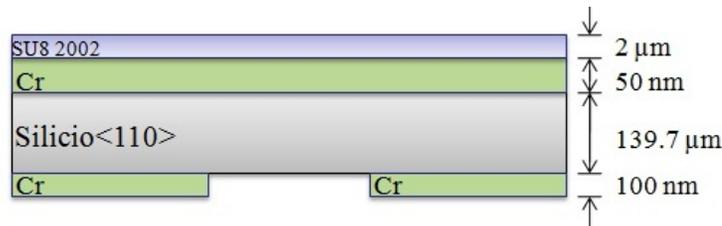


Figura 3.4 Esquema del sustrato de silicio con depósito de cromo y SU8 2002.

6. *Cocido suave*. Una vez que depositamos la resina sobre la oblea de silicio, se hornea la muestra para evaporar el solvente y densificar la película. De acuerdo al espesor deseado y a las especificaciones del fabricante seleccionamos el tiempo y temperatura de 1 min a 90 °C (ver Apéndice A). La Figura 3.5 nos muestra el esquema de la posición de la muestra para hornearla.

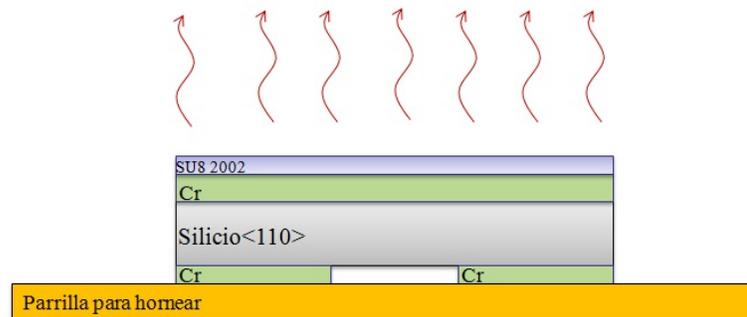


Figura 3.5 Esquema del cocido de la película de SU8 2002.

7. *Exposición a luz UV*. Para endurecer y adherir la película de SU8 2002 a la muestra, exponemos la película a luz ultravioleta (UV) por 300 segundos. La

Figura 3.6 nos muestra el esquema de la exposición del polímero SU8 2002 a la luz UV utilizando una lámpara.

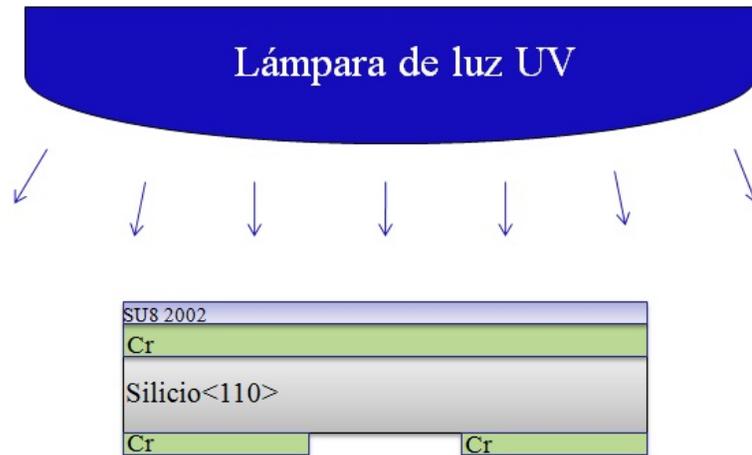


Figura 3.6 Esquema de la exposición a la luz UV.

8. *Cocido suave.* Nuevamente horneamos a 90 °C por 3 min (ver Figura 3.5), este paso nos permite enlazar las moléculas de la película de polímero. También, podemos evaluar si los pasos anteriores fueron realizados adecuadamente, esto es, si al final del cocido se ven grietas en el polímero, es porque hubo algún error en los pasos anteriores como demasiada exposición a luz UV, limpieza o demasiado calentamiento de la película de polímero.
9. *Revelado.* Para que sea definido un grabado en el polímero, la muestra es sumergida en un revelador [2]. En nuestro caso, nosotros no grabamos una figura en el polímero, por lo que el revelado lo utilizamos para remover cualquier impureza de polímero sobre la muestra, quedándonos sólo la película de polímero que utilizaremos como membrana.
10. *Limpieza.* Para detener el revelado hay que remover el líquido revelador de la muestra, para ello lavamos la muestra con agua desionizada y secamos con aire comprimido.

11. *Cocido fuerte.* Como la película de resina se va a utilizar en el producto final, los fabricantes recomiendan un cocido fuerte de la muestra, el cual, es hornear la muestra a 150 °C por 30 min (ver figura 3.5). Este paso es clave si queremos que el polímero resista los pasos siguientes.
12. *Ataque químico.* El ataque químico al silicio se hizo con KOH, para ello preparamos la solución a un 20 % de peso entre KOH y agua desionizada, el tiempo de ataque es de 2 hr 30 min aproximadamente.
13. *Limpieza.* Después detenemos el ataque sumergiendo la muestra en agua desionizada, este paso y los subsecuentes deben de ser realizados con extrema precaución en la manipulación de la muestra, ya que la membrana es muy sensible y puede romperse con facilidad. La Figura 3.7 nos muestra el esquema de la membrana después de finalizar el ataque químico al silicio.



Figura 3.7 Esquema de la membrana de cromo y polímero SU8 2002.

14. *Depósito del reflejante.* Por último, depositamos aluminio con 99.99 por ciento de pureza para usarlo como reflejante, los parámetros de depósito se muestran en la Tabla 3.2

El espesor de la película de aluminio es de 100nm, porque así evitamos el efecto "skindeep", además, es el espesor que usa David L. Dickensheets[4]. La Figura 3.8 nos muestra el esquema de la construcción del espejo con películas de cromo, polímero SU8 2002 y aluminio.

Presión	$1.8 \times 10^{-5} Torr$
velocidad de depósito	$>0.1 \text{ nm/s}$
voltaje	3 V
Corriente	40 A

Tabla 3.2. Parámetros para el depósito de aluminio para el espejo deformable

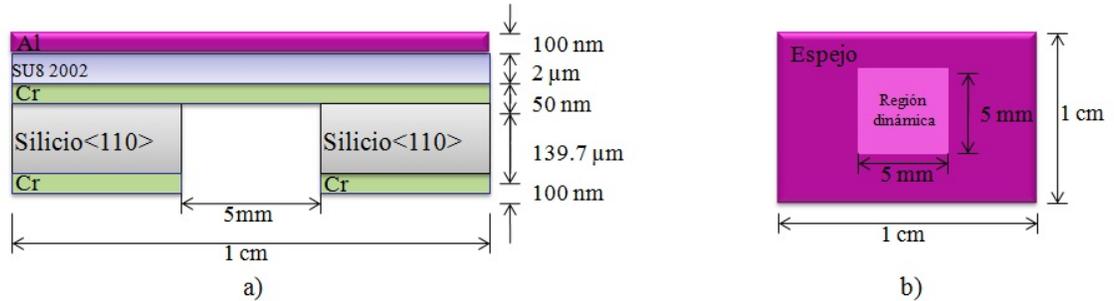


Figura 3.8 Esquema del espejo con región dinámica de cromo, polímero SU8 2002 y aluminio. El inciso a) muestra el corte transversal del espejo y el inciso b) muestra la superficie del espejo.

3.1.2. Metodología 2

Con esta metodología fabricamos un espejo deformable utilizando películas de polímero (SU8 2002) y aluminio como parte dinámica, los pasos son los siguientes:

1. *Preparación del substrato (Silicio).* Como en la metodología 1, el substrato que se utilizó es silicio (Si), tiene orientación cristalina $\langle 110 \rangle$, está dopado de fósforo (D(P)) y su espesor es de $139.7 \mu\text{m}$. Para utilizarlo como substrato cortamos la oblea de silicio en forma cuadrada de un $\sim 1 \text{ cm}^2$ (ver Figura 3.1) Eliminamos polvo u otra sustancia adherida al silicio procedente de su manipulación durante el corte, sumergiendo la oblea en acetona, después en alcohol isopropílico y por último se limpia con agua desionizada y se seca con nitrógeno de alta pureza o aire comprimido para componentes electrónicos (sin químicos).

2. *Depósito de cromo.* Antes del depósito, colocamos una máscara cuadrada de 5 mm^2 de papel aluminio en cada lado del sustrato de silicio, para adherir el aluminio al silicio utilizamos plastilina. Las máscaras deben estar alineadas en sus lados con el plano cristalográfico del silicio y también de estar alineadas entre ellas, el objetivo de alinear las máscaras entre ellas, es para que después del ataque químico la membrana sea sólo de polímero SU8 2002.

Después de colocar las máscaras, depositamos cromo en cada lado de la muestra, Para depositar el cromo los parámetros que utilizamos se muestran en la Tabla 3.3

Presión	$1.8 \times 10^{-5} \text{ Torr}$
Velocidad de Depósito	menor a 0.2 nm/s
Voltaje	3 V
Corriente	80 A

Tabla 3.3. Parámetros para el depósito de cromo.

El espesor de cromo para el lado que se utiliza como máscara de ataque húmedo es de 100 nm (ya que el KOH no ataca el cromo, ver Sección 2.2.3 del Capítulo 2). En el lado donde se utiliza como adhesivo para la fotorresina de SU8 2002, depositamos 50 nm . La Figura 3.9 nos muestra el esquema del sustrato de silicio con el depósito de cromo en ambas caras de la oblea.

3. *Limpieza.* Después del depósito, limpiamos la muestra con alcohol isopropílico, agua desionizada y después lo secamos, esto se hace porque el proceso de depósito de cromo es sucio y también así eliminamos la plastilina adherida al silicio.

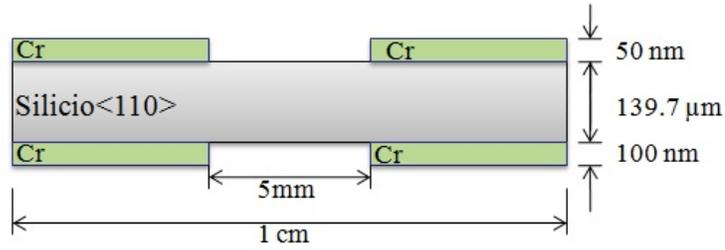


Figura 3.9 Esquema del sustrato de silicio con depósito de cromo en ambos lados del silicio.

4. *Cocido fuerte.* Para que no queden residuos de agua a nivel molecular, horneamos la muestra a 200 °C durante 5 minutos en la parrilla.
5. *Spin coating.* Se deposita una película polímero SU8 2002 de $\sim 2 \mu\text{m}$ de espesor sobre el sustrato colocando una gota del polímero y después rotando la muestra a 3000 rpm por 30 segundos (ver Apéndice A). La película es depositada en el lado donde se tiene 50 nm de Cr, la Figura 3.10 nos muestra el esquema de la fabricación del espejo deformable hasta éste paso.

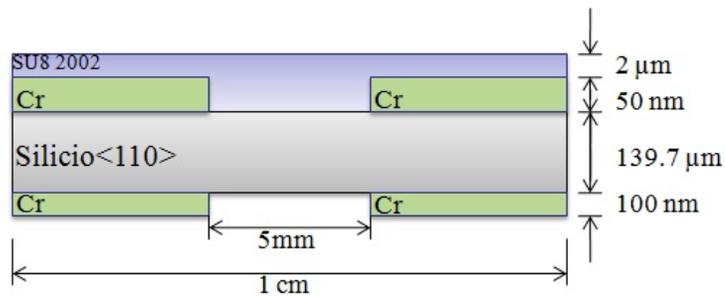


Figura 3.10 Esquema del sustrato de silicio con depósito de cromo y SU8 2002.

6. *Cocido suave.* Una vez que depositamos la resina sobre la oblea de silicio, se hornea la muestra para evaporar el solvente y densificar la película. De acuerdo al espesor deseado y a las especificaciones del fabricante seleccionamos el tiempo

y temperatura de 1 min a 90 °C (ver Apéndice A). La Figura 3.11 nos muestra el esquema de la posición de la muestra para hornearla.

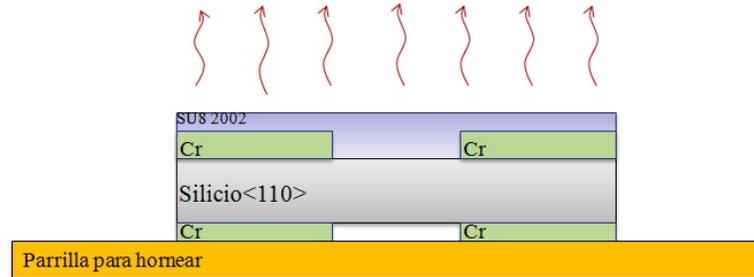


Figura 3.11 Esquema del cocido del SU8 2002 después de su depósito.

7. *Exposición a luz UV.* Para endurecer y adherir la película de SU8 2002 a la muestra, exponemos la película a luz ultravioleta (UV) por 100 segundos. La Figura 3.12 nos muestra el esquema de la exposición del polímero SU8 2002 a la luz UV utilizando una lámpara.

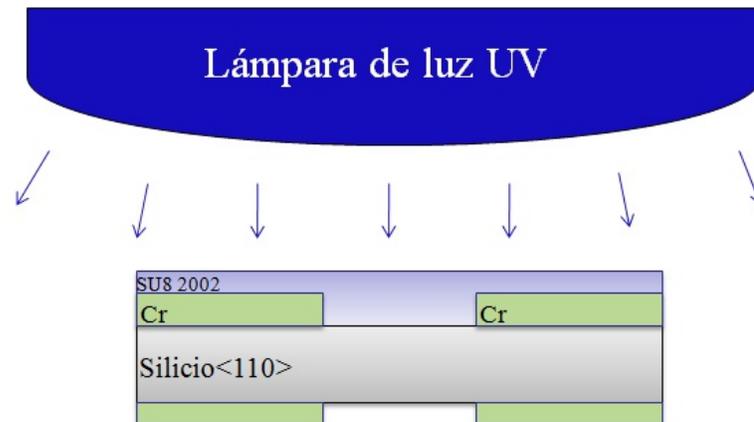


Figura 3.12 Esquema de la exposición a la luz UV.

8. *Cocido suave.* Nuevamente hornecemos a 90 °C por 3 min (ver Apéndice A), La Figura 3.11 nos muestra el esquema del cocido de la muestra.

9. *Revelado*. Para que sea definido un grabado en el polímero, la muestra es sumergida en un revelador [2]. En éste caso, nosotros no grabamos una figura en el polímero, por lo que el revelado lo utilizamos para remover cualquier impureza de polímero sobre la muestra, quedándonos sólo la película de polímero que utilizaremos como membrana.
10. *Limpieza*. Para detener el revelado hay que remover el líquido revelador de la muestra, para ello, lavamos la muestra con agua desionizada y secamos con aire comprimido.
11. *Cocido fuerte*. Como la película de resina se va a utilizar en el producto final, los fabricantes recomiendan un cocido fuerte de la muestra, el cual, es hornear la muestra a 150 °C por 30 min (ver figura 3.11). Este paso es clave si queremos que el polímero resista los pasos siguientes.
12. *Ataque químico*. El ataque químico al silicio se hizo con KOH, para ello preparamos la solución a un 30 % de peso entre KOH y agua desionizada, el tiempo de ataque es de 1 hr 30 min aproximadamente.
13. *Limpieza*. Después detenemos el ataque sumergiendo la muestra en agua desionizada. La Figura 3.13 nos muestra el esquema de la membrana después de finalizar el ataque químico al silicio.



Figura 3.13 Esquema de la membrana de polímero SU8 2002.

14. *Depósito del reflejante*. Por último, depositamos aluminio con 99.99 por ciento

de pureza para usarlo como reflejante, los parámetros de depósito se muestran en la Tabla 3.4

Presión	$1.8 \times 10^{-5} Torr$
velocidad de depósito	$>0.1 \text{ nm/s}$
voltaje	3 V
Corriente	40 A

Tabla 3.4. Parámetros para el depósito de aluminio para el espejo deformable

El espesor de la película de aluminio es de 100nm, porque así evitamos el efecto "skindeep", además, es el espesor que usa David L. Dickensheets[4]. La Figura 3.14 nos muestra el esquema de la construcción del espejo con región dinámica de polímero SU8 2002 y aluminio.

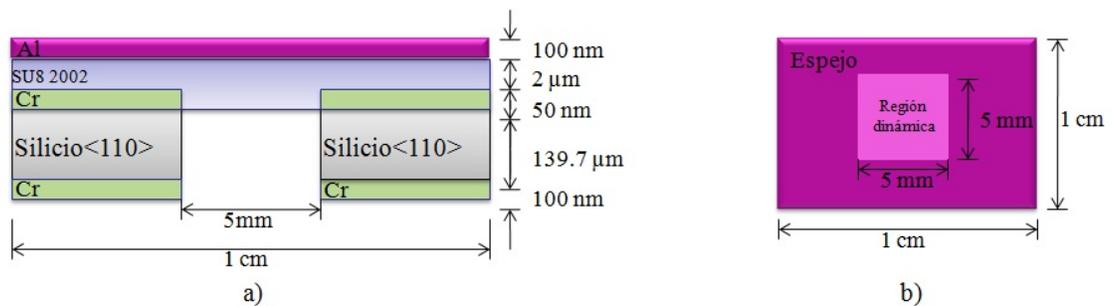


Figura 3.14 Esquema del espejo con región dinámica de polímero SU8 2002 y aluminio. El inciso a) muestra el corte transversal del espejo y el inciso b) muestra la superficie del espejo.

3.1.3. Metodología 3

Con esta metodología fabricamos un espejo deformable utilizando películas de polímero (SU8 2002) y aluminio como parte dinámica, la diferencia con la metodología 2 esta en el espesor de la membrana de SU8 2002 ($4 \mu\text{m}$) y en el espesor del aluminio (20 nm); los pasos son los siguientes:

1. *Preparación del substrato (Silicio)*. Como en la metodología 1 y 2, el substrato que se utilizó es silicio (Si), tiene orientación cristalina $\langle 110 \rangle$, está dopado de fósforo (D(P)) y su espesor es de $139.7 \mu\text{m}$. Para utilizarlo como substrato cortamos la oblea de silicio en forma de cuadrada de un $\sim 1 \text{ cm}^2$ (ver Figura 3.1)

Eliminamos polvo u otra sustancia adherida al silicio procedente de su manipulación durante el corte, sumergiendo la oblea en acetona, después en alcohol isopropílico y por último se limpia con agua desionizada y se seca con nitrógeno de alta pureza o aire comprimido para componentes electrónicos (sin químicos).

2. *Depósito de cromo*. Antes del depósito, colocamos una máscara cuadrada de 5 mm^2 de papel aluminio en cada lado del substrato de silicio, para adherir el aluminio al silicio utilizamos plastilina. Las máscaras deben estar alineadas en sus lados con el plano cristalográfico del silicio y también de estar alineadas entre ellas, el objetivo de alinear las máscaras entre ellas, es para que después del ataque químico la membrana sea sólo de polímero SU8 2002.

Después de colocar las máscaras, depositamos cromo en cada lado de la muestra, Para depositar el cromo los parámetros que utilizamos se muestran en la Tabla 3.5

Presión	$1.8 \times 10^{-5} \text{ Torr}$
Velocidad de Depósito	menor a 0.2 nm/s
Voltaje	3 V
Corriente	80 A

Tabla 3.5. Parámetros para el depósito de cromo.

El espesor de cromo para el lado que se utiliza como máscara de ataque húmedo es de 100 nm (ya que el KOH no ataca el cromo, ver Sección 2.2.3 del Capítulo 2). En el lado donde se utiliza como adhesivo para la fotorresina de SU8 2002,

depositamos 50 nm. La Figura 3.9 de la metodología 2 nos muestra el esquema del substrato de silicio con el depósito de cromo en ambas caras de la oblea.

3. *Limpieza.* Después del depósito, limpiamos la muestra con alcohol isopropílico, agua desionizada y después lo secamos, esto se hace porque el proceso de depósito de cromo es sucio y también así eliminamos la plastilina adherida al silicio.
4. *Cocido fuerte.* Para que no queden residuos de agua a nivel molecular, horneamos la muestra a 200 °C durante 5 minutos en la parrilla.
5. *Spin coating.* Se deposita una película polímero SU8 2002 de $\sim 2 \mu\text{m}$ de espesor sobre el substrato colocando una gota del polímero y después rotando la muestra a 3000 rpm por 30 segundos (ver Apéndice A). La película es depositada en el lado donde se tiene 50 nm de Cr
6. *Cocido suave.* Una vez que depositamos la resina sobre la oblea de silicio, se hornea la muestra para evaporar el solvente y densificar la película. De acuerdo al espesor deseado y a las especificaciones del fabricante seleccionamos el tiempo y temperatura de 1 min a 90 °C (ver Apéndice A). La Figura 3.11 de la metodología 2 nos muestra el esquema de la posición de la muestra para hornearla.
7. *Spin coating.* Debido a que queremos incrementar el grosor de la película de SU8 2002, volvemos a depositar una gota de SU8 2002 sobre la anterior película de polímero y rotamos la muestra a 3000 rpm por 30 segundos (ver Apéndice A).
8. *Cocido suave.* Se hornea la muestra para evaporar el solvente y densificar la película. Por el espesor y de acuerdo a las especificaciones del fabricante se-

leccionamos el tiempo y temperatura de 3 min a 90 °C (ver Apéndice A). La Figura 3.15 nos muestra el esquema de la muestra hasta este paso.

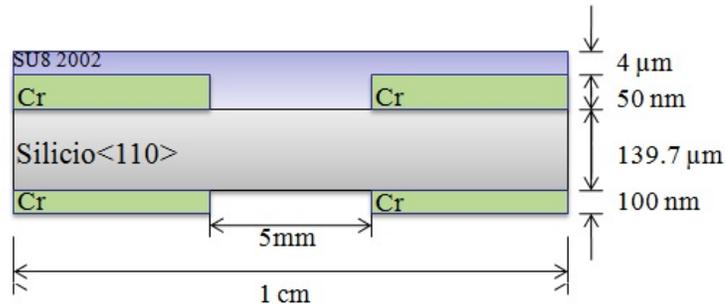


Figura 3.15 Esquema del sustrato de silicio con depósito de cromo y 4 μm de SU8 2002.

9. *Exposición a luz UV.* Para endurecer y adherir la película de SU8 2002 a la muestra, exponemos la película a luz ultravioleta (UV) por 100 segundos. La Figura 3.12 de la metodología 2 nos muestra el esquema de la exposición del polímero SU8 2002 a la luz UV utilizando una lámpara.
10. *Cocido suave.* Nuevamente horneamos a 90 °C por 3 min (ver Apéndice A).
11. *Revelado.* Para que sea definido un grabado en el polímero, la muestra es sumergida en un revelador [2]. En éste caso, nosotros no grabamos una figura en el polímero, por lo que el revelado lo utilizamos para remover cualquier impureza de polímero sobre la muestra, quedándonos sólo la película de polímero que utilizaremos como membrana.
12. *Limpieza.* Para detener el revelado hay que remover el líquido revelador de la muestra, para ello, lavamos la muestra con agua desionizada y secamos con aire comprimido.
13. *Cocido fuerte.* Como la película de resina se va a utilizar en el producto final, los fabricantes recomiendan un cocido fuerte de la muestra, el cual, es hornear

la muestra a 150 °C por 30 min (ver figura 3.11). Este paso es clave si queremos que el polímero resista los pasos siguientes.

14. *Ataque químico.* El ataque químico al silicio se hizo con KOH, para ello preparamos la solución a un 30 % de peso entre KOH y agua desionizada, el tiempo de ataque es de 1 hr 30 min aproximadamente.
15. *Limpieza.* Después detenemos el ataque sumergiendo la muestra en agua desionizada.
16. *Depósito del reflejante.* Por último, depositamos aluminio con 99.99 por ciento de pureza para usarlo como reflejante, los parámetros de depósito se muestran en la Tabla 3.6

Presión	$1.8 \times 10^{-5} Torr$
velocidad de depósito	$>0.1 \text{ nm/s}$
voltaje	3 V
Corriente	40 A

Tabla 3.6. Parámetros para el depósito de aluminio para el espejo deformable

El espesor de la película de aluminio es de 20nm, porque así evitamos evitamos que sea menos rígida la parte dinámica del espejo. La Figura 3.16 nos muestra el esquema de la construcción del espejo con región dinámica de polímero SU8 2002 y aluminio.

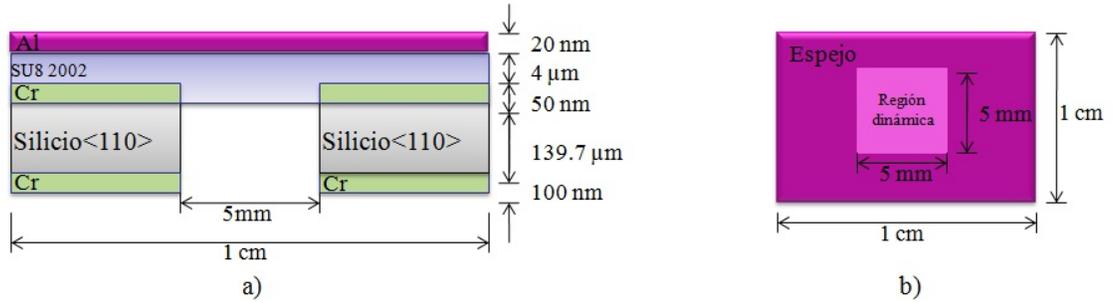


Figura 3.16 Esquema del espejo con región dinámica de $4 \mu\text{m}$ de polímero SU8 2002 y 20 nm de aluminio. El inciso a) muestra el corte transversal del espejo y el inciso b) muestra la superficie del espejo.

3.1.4. Ensamble del espejo deformable por campo eléctrico

Una vez que fabricamos los espejos de acuerdo a la metodología 1, 2 o 3 colocamos un electrodo para que funcione como actuador de campo eléctrico (ver Figura 3.17).

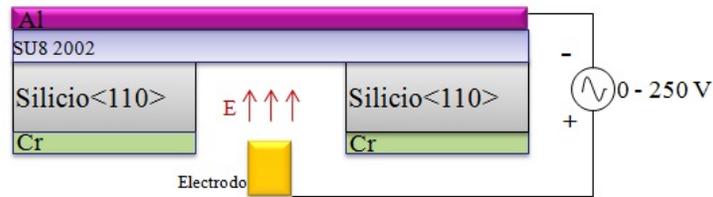


Figura 3.17 Esquema del espejo deformable por campo eléctrico.

El electrodo básicamente es un alambre de cobre de 1.2 mm de diámetro y esta pulido en la punta (ver Figura 3.18). El pulir la punta hace que el campo no se concentre en una sola región del electrodo y así líneas de campo eléctrico son uniformes.

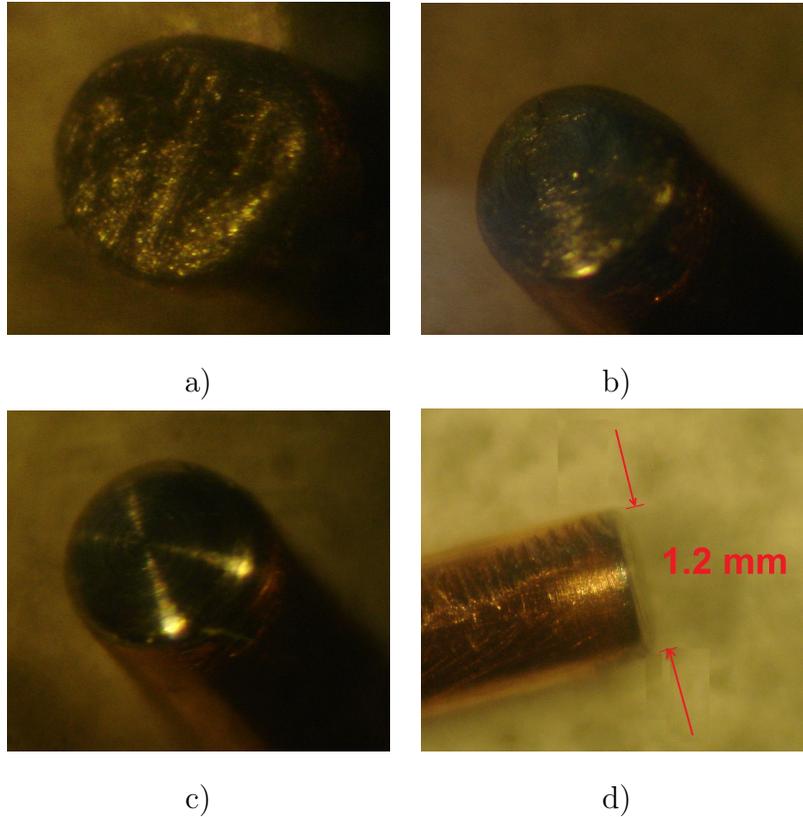


Figura 3.18 Electrodo para el espejo deformable a) después del primer pulido con lija del número 2400, b)segundo pulido con lija del número 3200, c) tercer pulido con lija del número 3600 y d) vista transversal.

El electrodo se colocó en una base que tiene teflon. El teflon sirve como aislante para el electrodo (ver Figura 3.19) ya que por él pasa un voltaje de 0 a 250 V positivos. Con el recubrimiento de aluminio del espejo se cierra el circuito conectandola a negativo y generar el campo eléctrico. Finalmente el electrodo con su base se monta sobre una platina óptica para poder ajustar su distancia con la parte dinámica del espejo deformable (membrana).



Figura 3.19 Base del electrodo con su conector.

Por otra parte, el espejo se monta sobre una base para poder colocarlo frente al electrodo. La base consta de una pinza para poder sostenerlo sin romperlo. Por medio de la pinza se conecta el espejo a negativo. Después la pinza es colocada a un soporte, el cual, nos permite ajustar el plano del espejo deformable con el haz del diodo láser (ver Figura 3.20). Por último, toda la base es montada sobre una platina óptica (ver Figura 3.21).

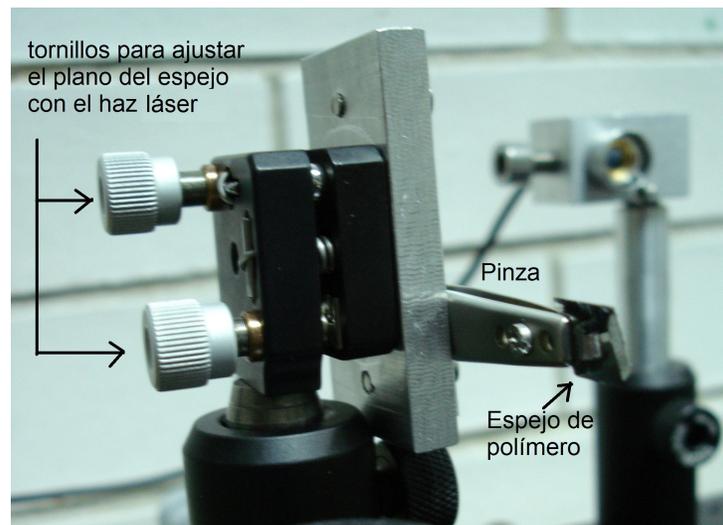


Figura 3.20 Base del espejo deformable con movimiento para ajustar el plano del espejo con el haz láser.

La Figura 3.21 muestra la colocación física del electrodo con el espejo, en ella podemos ver la dirección en que se mueve el electrodo para ajustar su distancia con el espejo, la dirección de movimiento del espejo para alinear el electrodo con el haz láser y también muestra los tornillos para ajustar el plano del espejo con el haz láser.

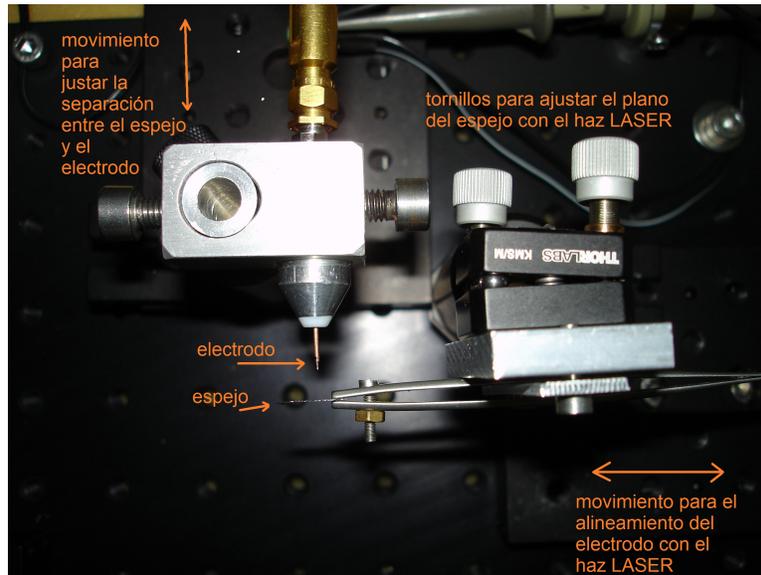


Figura 3.21 Posición del espejo y el electrodo con sus movimientos.

3.1.5. Acondicionamiento de señal eléctrica para el espejo deformable por campo eléctrico

Para deformar la superficie del espejo de membrana de polímero se necesita proveer voltajes de aproximadamente de 300 V [4], para ello se utilizó el amplificador PA79 y de acuerdo a las hojas de especificaciones (Apéndice B) se diseñó el circuito para obtener una amplificación de 0-5 V a 0-300 V, cada circuito integrado cuenta con dos amplificadores. La configuración del circuito es amplificador no inversor el cual tiene una relación de entrada y salida de acuerdo a la ecuación 3.1.

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.1)$$

Así se seleccionó una resistencia de $R_2= 4.7 \text{ M}\Omega$ y otra de $R_1= 100 \text{ K}\Omega$ así podemos cubrir el rango de voltaje requerido para deformar el espejo de polímero cubierto de una película de aluminio. En la Figura 3.22 y 3.23 se muestra el diagrama del circuito de un amplificador PA79 y el PCB (printed circuit board) del circuito, como el PA79 es reciente en el mercado, en el programa PROTEUS se diseñó el símbolo del dispositivo para hacer el circuito y el PCB con las dimensiones adecuadas al tamaño mostrado en las hojas de especificaciones (ver Apéndice B) para hacer el circuito impreso.

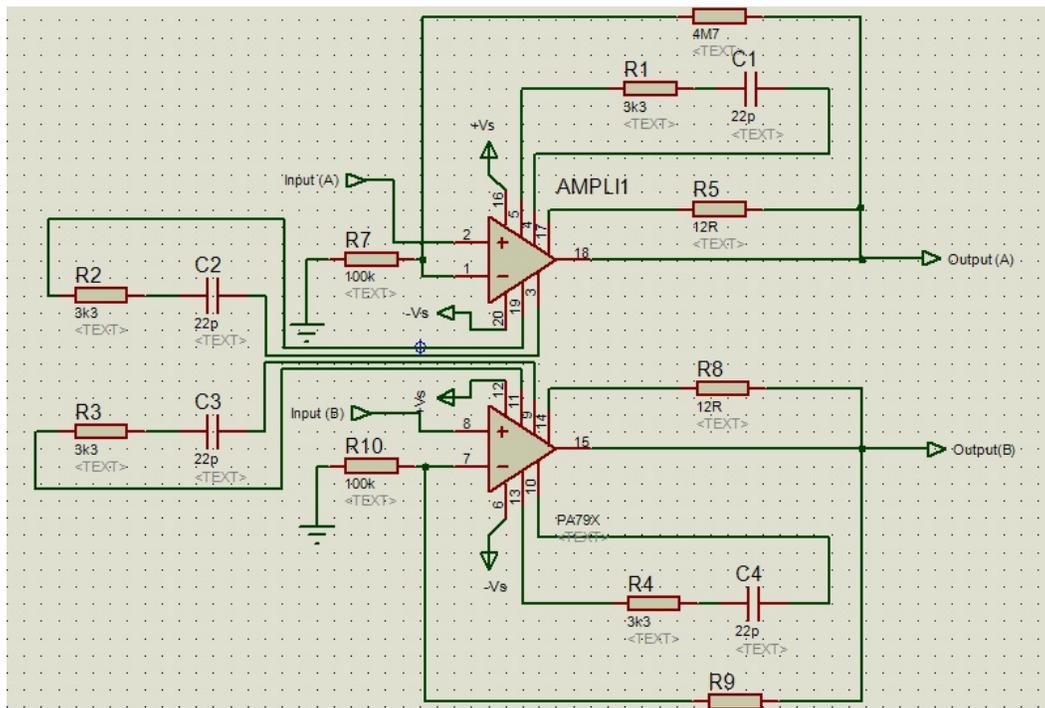


Figura 3.22 Diagrama para amplificador PA79.

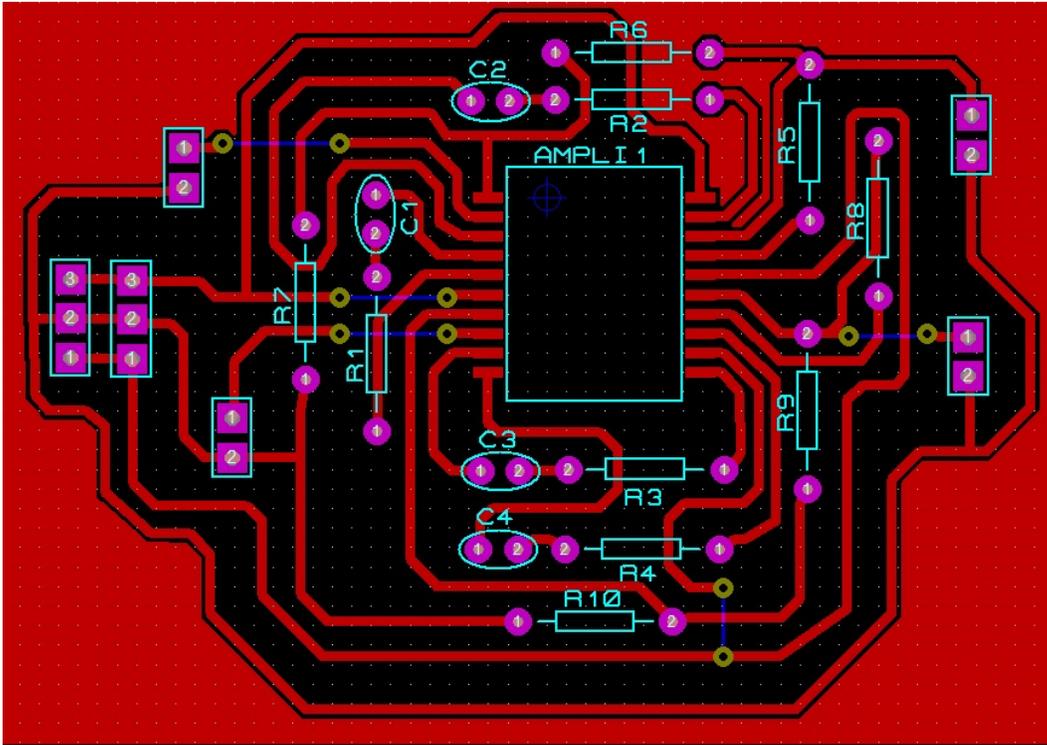


Figura 3.23 PCB para amplificador PA79.

3.2. Interferómetro de Michelson para la caracterización del espejo deformable

Utilizamos un Interferómetro de Michelson[1] para medir la deflexión de la región dinámica de los espejos debido al campo eléctrico producido entre la cubierta de aluminio y un electrodo; la Figura 3.24 muestra el esquema del interferómetro que utilizamos, en él, se muestra que el interferómetro tiene un espejo rígido en uno de los brazos y el espejo deformable en el otro.

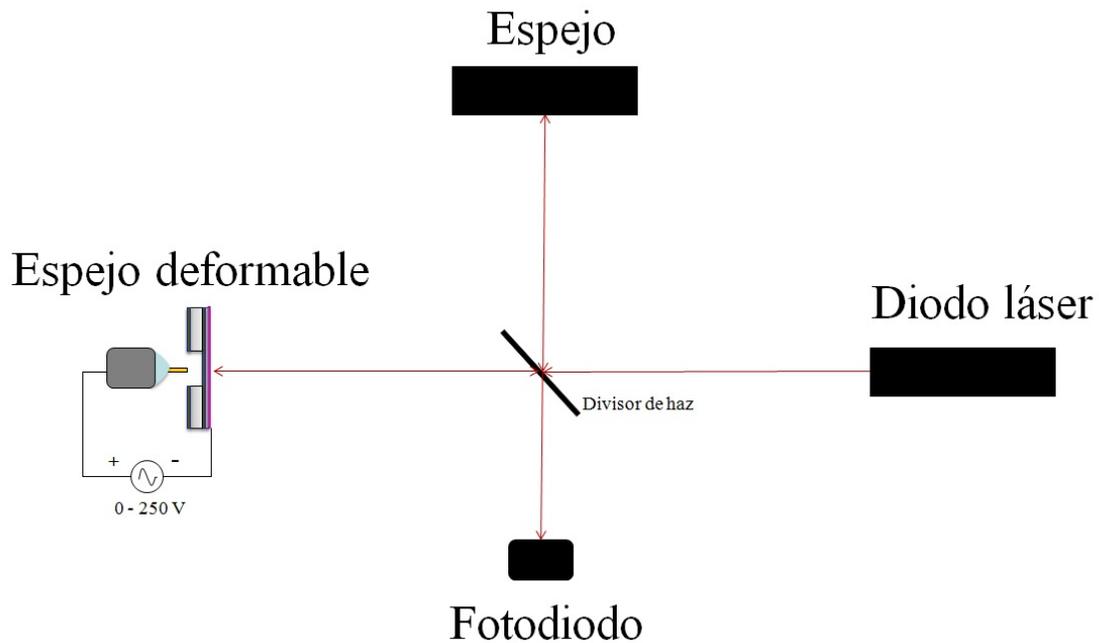


Figura 3.24 Esquema del Interferómetro de Michelson.

Los componentes que utilizamos para construir nuestro Interferómetro de Michelson son:

- Diodo láser L785P100 de Thorlabs, con longitud de onda (λ) de 785 nm.
- Fotodiodo FDS 100 de Thorlabs
- Divisor de haz (50 - 50 %)
- espejo(rígido)
- espejo deformable

La Figura 3.25 muestra el Interferómetro de Michelson que construimos de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 3.24.

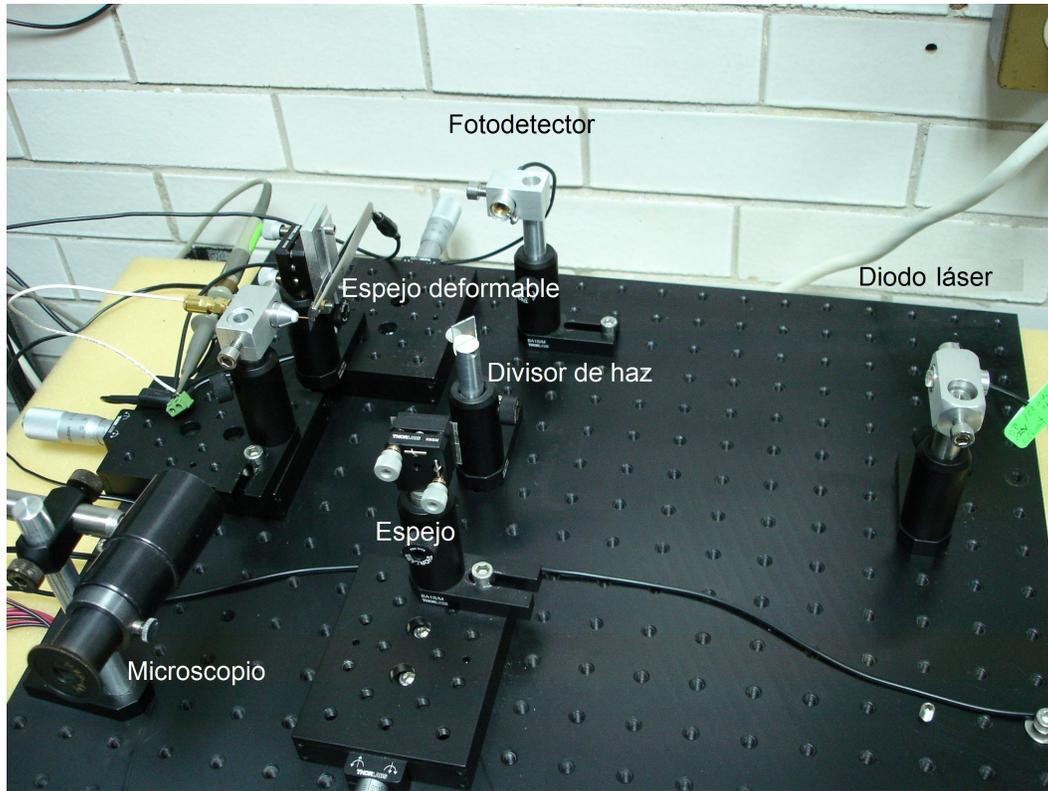


Figura 3.25 Interferómetro de Michelson.

El procedimiento para la medición de la deflexión de la región dinámica del espejo es el siguiente:

1. Antes de colocar el espejo deformable, se alinea el haz del láser con el electrodo, para ello, primero se apunta el haz del láser al electrodo para iluminar su superficie pulida, y después, el spot del haz se ajusta con el tamaño del diámetro del electrodo.
2. Se coloca el centro de la región dinámica del espejo en frente del electrodo.
3. Se alinea los espejos para producir franjas de interferencia, las cuales serán detectadas con el fotodiodo.
4. Con el microscopio se ajusta la distancia entre el electrodo y la región dinámica

del espejo sin dañarlo (ver Figura 3.26).

5. Se envía una señal triangular de 0 a 250 V al actuador electrostático.
6. Se observa en el osciloscopio el número de franjas de interferencia que produce el desplazamiento de la región dinámica.
7. Por último, obtenemos la máxima deformación del espejo de acuerdo a la distancia entre el electrodo y la membrana al mover la platina óptica del electrodo y observar el máximo número de franjas de interferencia en el osciloscopio.

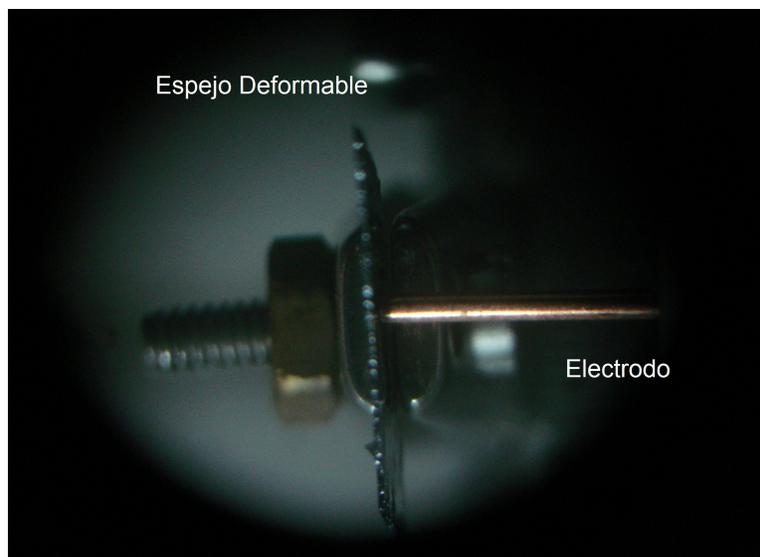


Figura 3.26 Posición del electrodo con el espejo deformable visto a través del microscopio.

En el Capítulo 4 se muestra como obtenemos el desplazamiento de la región dinámica de los espejos fabricados con la metodología 1, 2 o 3 a partir de las señales obtenidas con el osciloscopio.

Capítulo 4

Resultados y análisis del espejo deformable por campo eléctrico

En este capítulo presentamos los resultados del micromaquinado de los espejos y el análisis de deformación de los espejos que desarrollamos mediante las metodologías presentada en el Capítulo 3.

4.1. Resultados de deformación

Mostraremos tres diferentes espejos deformables, sus variaciones principales son en la parte dinámica de cada uno de ellos y las metodologías utilizadas se muestran en el Capítulo 3.

El primer espejo está compuesto de dos capas de metales y una de polímero SU8 2002, para su fabricación utilizamos la metodología 1. La segunda está fabricada con la metodología 2, por lo que esta compuesta de una capa de polímero SU8 2002 y una de aluminio. El tercer espejo deformable también está compuesto sólo de resina y aluminio, la diferencia entre las dos ultimas son el espesor de la resina y del aluminio, por lo que, utilizamos la metodología 3 para su fabricación.

El orden en que se muestran los espejos es el mismo en que se fueron desarrollando experimentalmente porque (como veremos más adelante) cada uno es una mejora del

anterior y su desempeño fue fundamental para la modificación del siguiente espejo.

4.1.1. Espejo deformable de multicapas como parte dinámica (cromo-polímero-aluminio)

El esquema del espejo se muestra en la Figura 4.1.

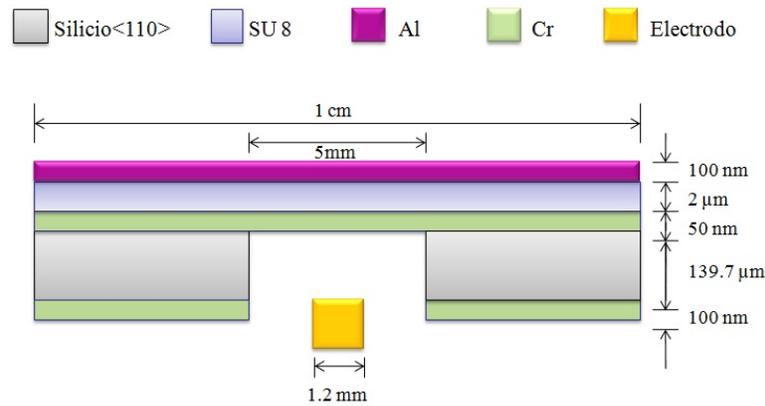


Figura 4.1 Esquema del espejo deformable de cromo-polímero-aluminio.

Para desarrollar este espejo utilizamos la metodología descrita en la Sección 3.1.1 del Capítulo 3. La ventaja de manufacturar este espejo es porque sólo usa una máscara de cromo que se utiliza para realizar el ataque químico.

Por la orientación cristalina del silicio utilizamos máscaras cuadradas para el proceso de grabado en volumen. El resultado del micromaquinado se muestra en la Figura 4.2, el inciso a) muestra la vista de lado del grabado, el inciso b) es la misma posición solo que tiene un acercamiento a la región dinámica del espejo, el inciso c) muestra la cara en donde se depósito el polímero, por último, el inciso d) muestra un acercamiento a la región dinámica del espejo de lado del polímero.

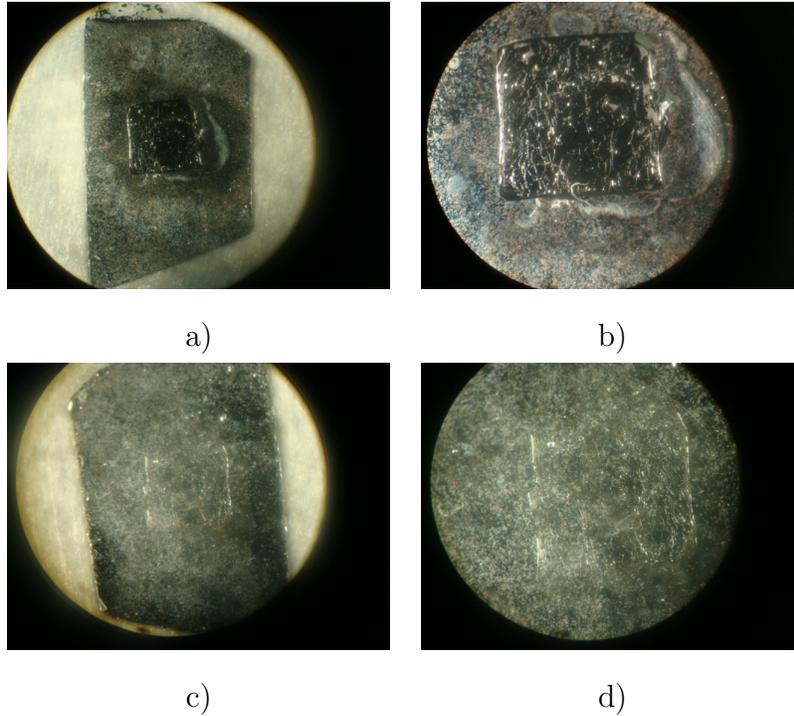


Figura 4.2 Resultado del micromaquinado del espejo deformable de cromo, polímero SU8 2002 y aluminio como parte dinámica.

En las fotos b) y d) de la Figura 4.2 podemos observar que el cromo presenta grietas, esto se debe a que el depósito de cromo es demasiado delgado (50 nm) y se quiebra por la membrana de polímero SU8 2002 ($2 \mu\text{m}$).

La deformación de la parte dinámica del espejo se midió con el Interferómetro de Michelson (ver Sección 3.2 del Capítulo 3). Leímos la deflexión al centro de la superficie dinámica al aplicar una rampa de alto voltaje para formar el campo electrostático.

El spot del haz láser es muy cercano al diámetro del electrodo que utilizamos como actuador electrostático, por lo que la deformación corresponde en promedio a la deflexión del área del espejo frente al actuador, el punto de medición se realizó al centro del espejo, el resultado se muestra en la Figura 4.3, en él podemos ver que se deflexiona aproximadamente un cuarto de longitud de onda que corresponde a $\sim 196 \text{ nm}$.

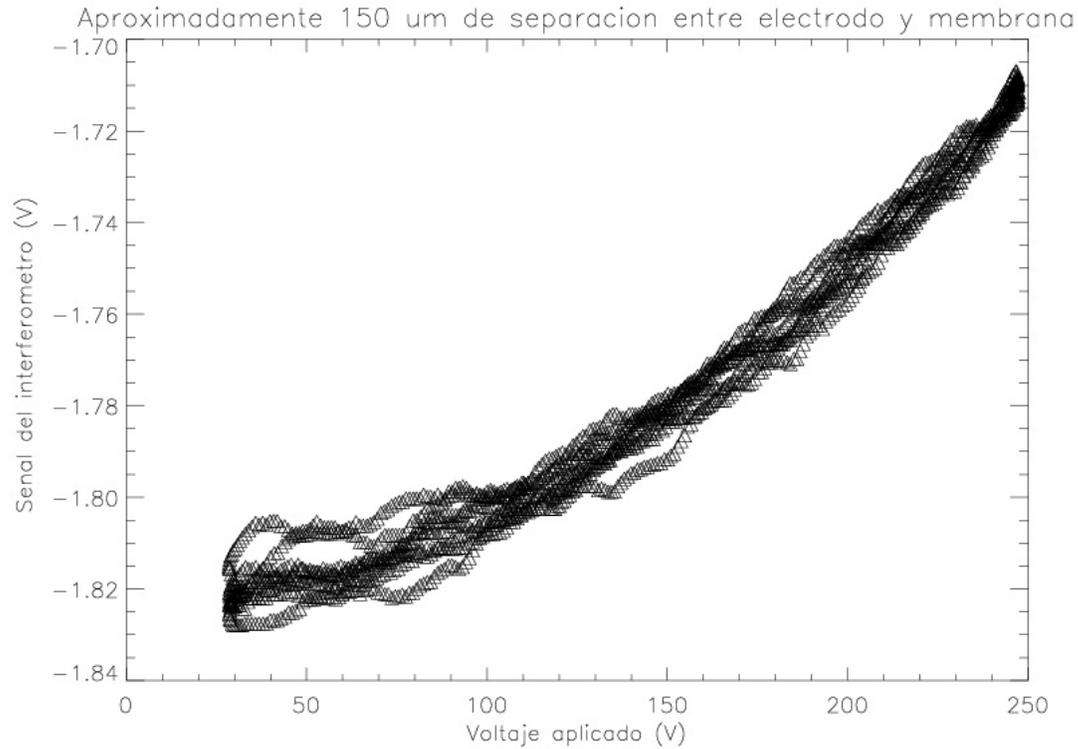


Figura 4.3 Franjas de interferencia por la deflexión del espejo con parte dinámica de cromo-polímero-aluminio.

El voltaje que se aplicó al actuador electrostático fue de 0 a 250V y la distancia entre el electrodo y la superficie dinámica del espejo es de 150 nm aproximadamente.

Uno de los defectos que presentó este espejo es que tiene reflexión difusa con preferencia especular [6], porque la película de cromo adherida al polímero se quiebra y hace que la superficie dinámica del espejo no sea completamente plana cuando depositamos aluminio (ver Figura 4.2), para resolver este problema la mejor solución fue colocar doble máscara para que no quedaran residuos de cromo en la membrana, el resultado se muestra en la sección 4.1.2 y 4.1.3 de este Capítulo.

4.1.2. Espejo deformable con parte dinámica de $2 \mu\text{m}$ de polímero y 100 nm de aluminio

Para fabricar este espejo se utilizó la metodología 2 que se muestra en el Capítulo 3 Sección 3.1.2, básicamente este espejo fue hecho depositando cromo en ambos lados de la oblea de silicio y en cada lado se puso una máscara. El propósito de las máscaras hacer el grabado en volumen y corregir el problema de esparcimiento presentado en la Sección 4.1 de este Capítulo. La Figura 4.4 muestra el esquema de como está hecho éste espejo.

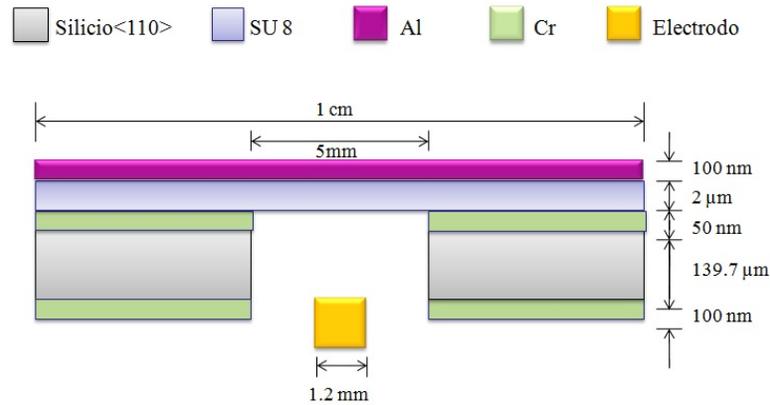


Figura 4.4 Esquema del espejo deformable con $2 \mu\text{m}$ de polímero SU8 2002 y 100 nm aluminio.

El resultado del micromaquinado se muestra en la Figura 4.5, donde, el inciso a) y b) muestra cada cara de la oblea después del grabado en volumen y se observa que no quedaron residuos de cromo en la membrana. Después de obtener la membrana le depositamos 100 nm de aluminio, el inciso c) de la Figura 4.5 nos muestra el resultado del deposito.

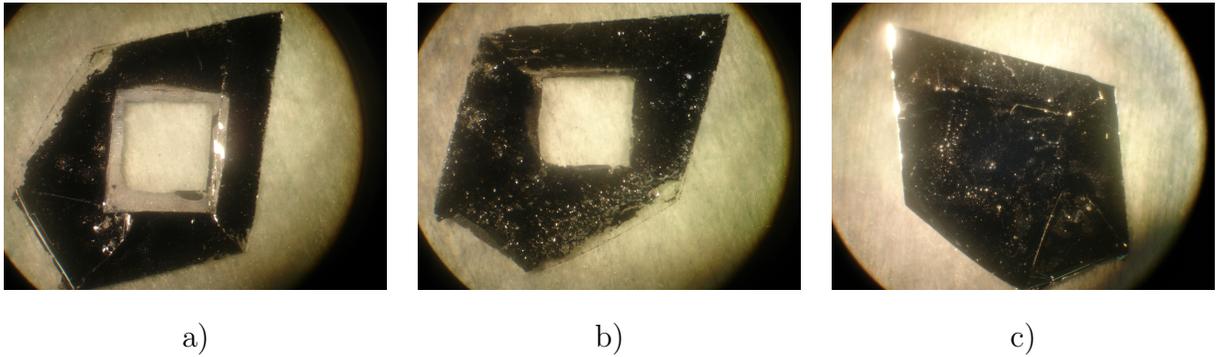


Figura 4.5 Resultado del micromaquinado del espejo deformable con $2 \mu\text{m}$ de polímero SU8 2002 y 100 nm aluminio.

La prueba de deformación se hizo con el Interferómetro de Michelson bajo las mismas condiciones explicadas en la Sección 3.2 del Capítulo 3. En éste caso sólo aplicamos hasta 80 V al actuador electrostático porque a más alto voltaje el haz reflejado se reflejaba de forma aleatoria ocasionando que el haz en ocasiones apuntara en dirección del láser, esto crea problemas al láser.

La reflexión aleatoria se debe a que este espejo presentó arrugas en la parte dinámica (posterior al deposito), pero, mostró una deformación controlable a una distancia de $140 \mu\text{m}$ con una deflexión de $\sim 1177.5 \text{ nm}$. La Figura 4.6 muestra las franjas de interferencia por la deformación del espejo al centro de la superficie dinámica.

El problema de las arrugas lo resolvimos depositando menos aluminio a la membrana y agregando $2 \mu\text{m}$ de polímero, los resultados los mostramos la Sección 4.1.3 de este Capítulo.

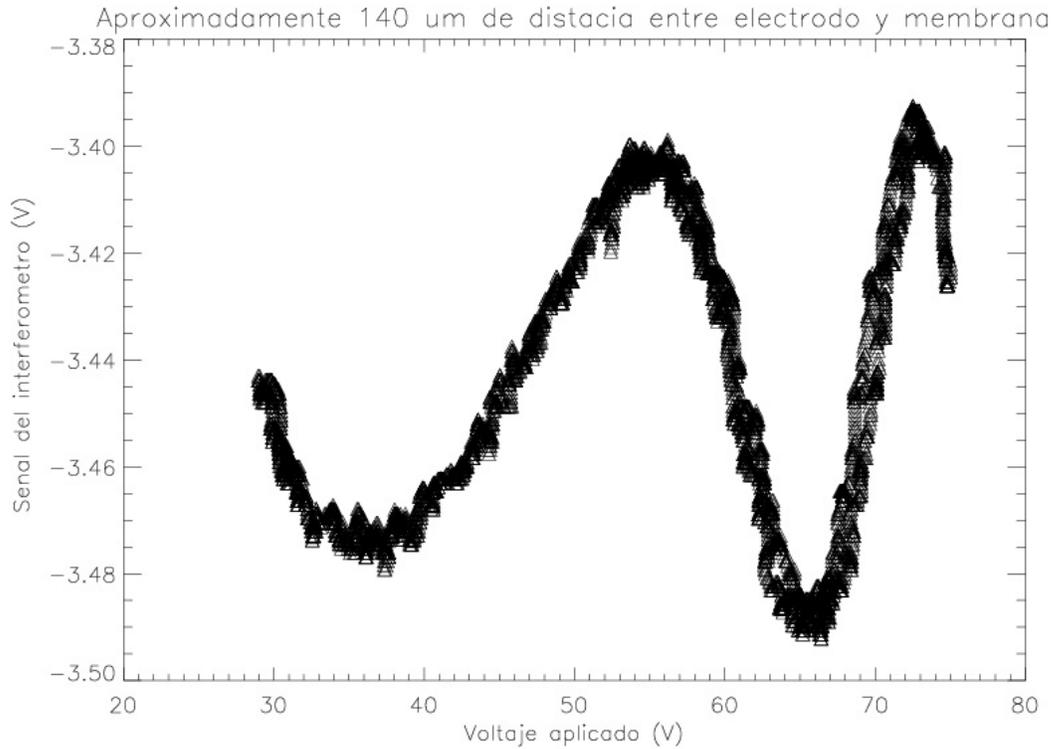


Figura 4.6 Franjas de interferencia por la deflexión de la región dinámica del espejo con 2 μm de polímero SU8 2002 y 100 nm aluminio.

4.1.3. Espejo deformable con parte dinámica de 4 μm de polímero y 20 nm de aluminio

El esquema de este espejo se muestra en la Figura 4.7. Para obtener una mejora con respecto al espejo de la Sección 4.1.2, éste espejo se fabricó con la metodología 3 expuesta en la Sección 3.1.3 del Capítulo 3.

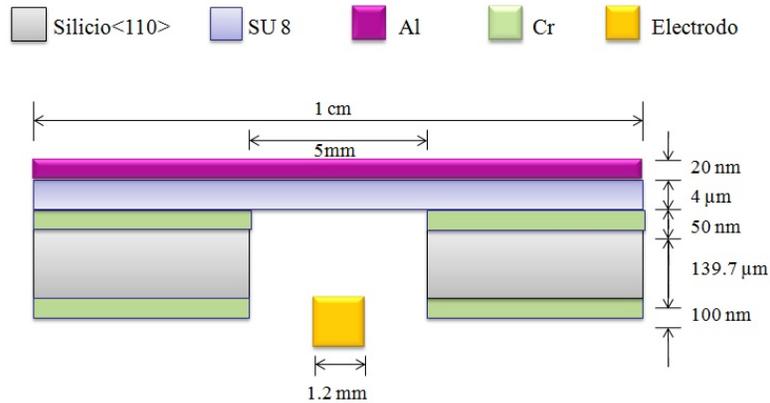


Figura 4.7 Esquema del espejo deformable con 4 μm de polímero SU8 2002 y 20 nm aluminio.

El resultado del micromaquinado se muestra en la Figura 4.8, en los incisos a) y b) se muestran ambas caras de la membrana, en el inciso c) y d) se muestra la membrana después del depósito de 20 nm de aluminio sobre el polímero SU8 2002. Por último, en los incisos e) y f) mostramos un acercamiento en la sección dinámica del espejo para revisar si presenta arrugas en la superficie.

Probamos el desempeño de la deformación de la parte dinámica del espejo con el Interferómetro de Michelson (ver Sección 3.2 del Capítulo 3) y se aplicó una señal triangular con voltajes de hasta 250 V para el actuador electrostático.

Durante la prueba se obtuvo una mejora considerable con respecto a los anteriores espejos, por lo que, realizamos dos pruebas para ver el desempeño de este espejo. El primero consiste en ver la respuesta de deformación con respecto a la distancia entre electrodo y el centro de la superficie dinámica del espejo (ver Figura 4.8.), la segunda consta de la respuesta de deformación con respecto a la frecuencia de la señal de excitación (ver Figura 4.9).

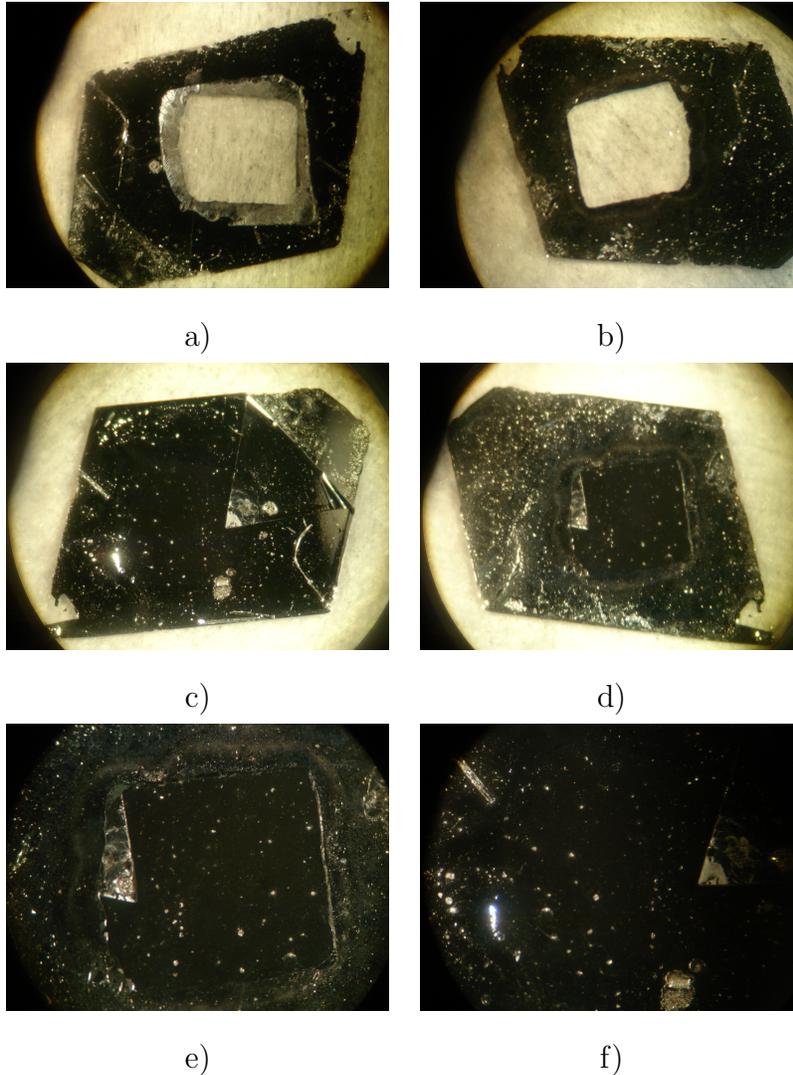


Figura 4.8 Resultado del micromaquinado del espejo deformable con parte dinámica de $4\mu\text{m}$ de polímero y 20 nm de aluminio.

En la Figura 4.8, la Gráfica donde se encuentran a $20\ \mu\text{m}$ de distancia entre el electrodo de la membrana, se puede observar al menos 8 franjas de interferencia por la deformación del espejo y a una separación de $100\ \mu\text{m}$ hay una deformación de al menos 2 franjas de interferencia por la deformación. En la Sección 4.2 analizaremos con más detalle los resultados obtenidos con este espejo deformable haciendo una comparación de su desempeño con espejos deformables comerciales y otros elaborados por institutos

de investigación.

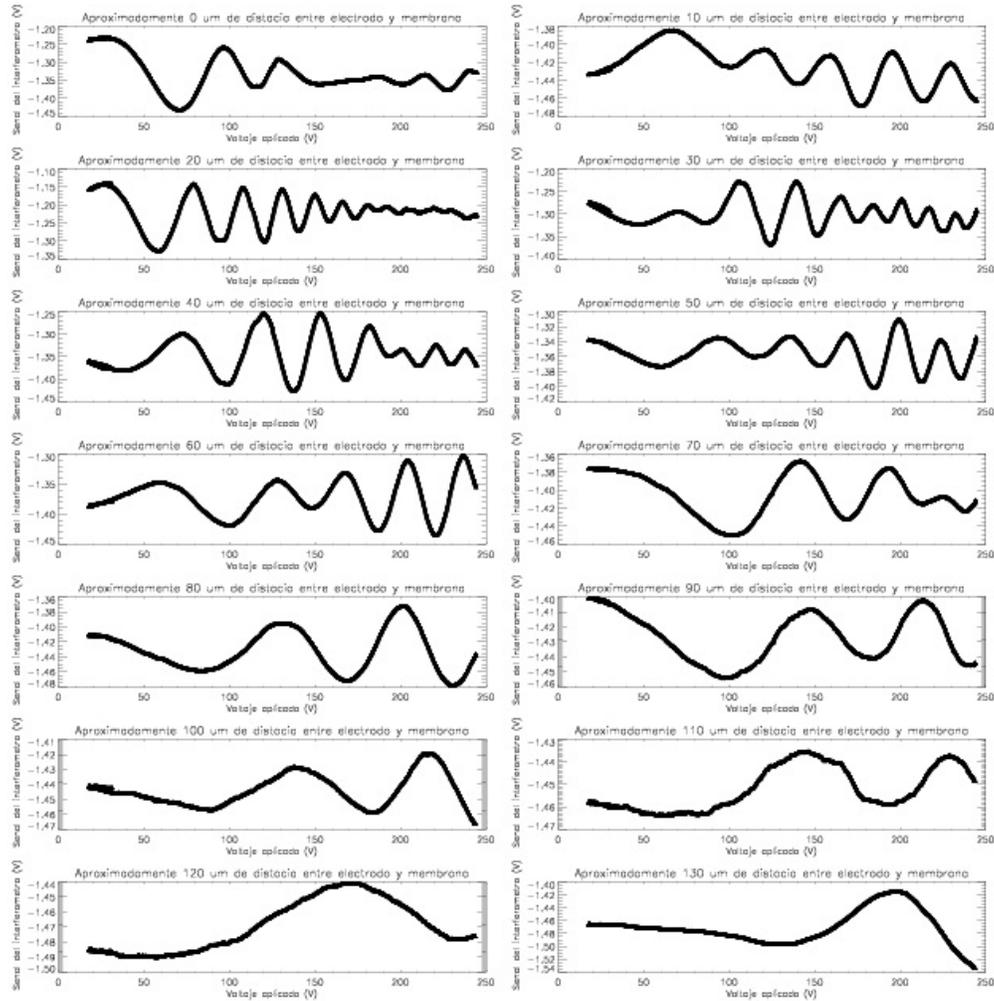


Figura 4.8 Franjas de interferencia por la deformación del espejo de polímero con 20nm aluminio variando la distancia entre electrodo y membrana.

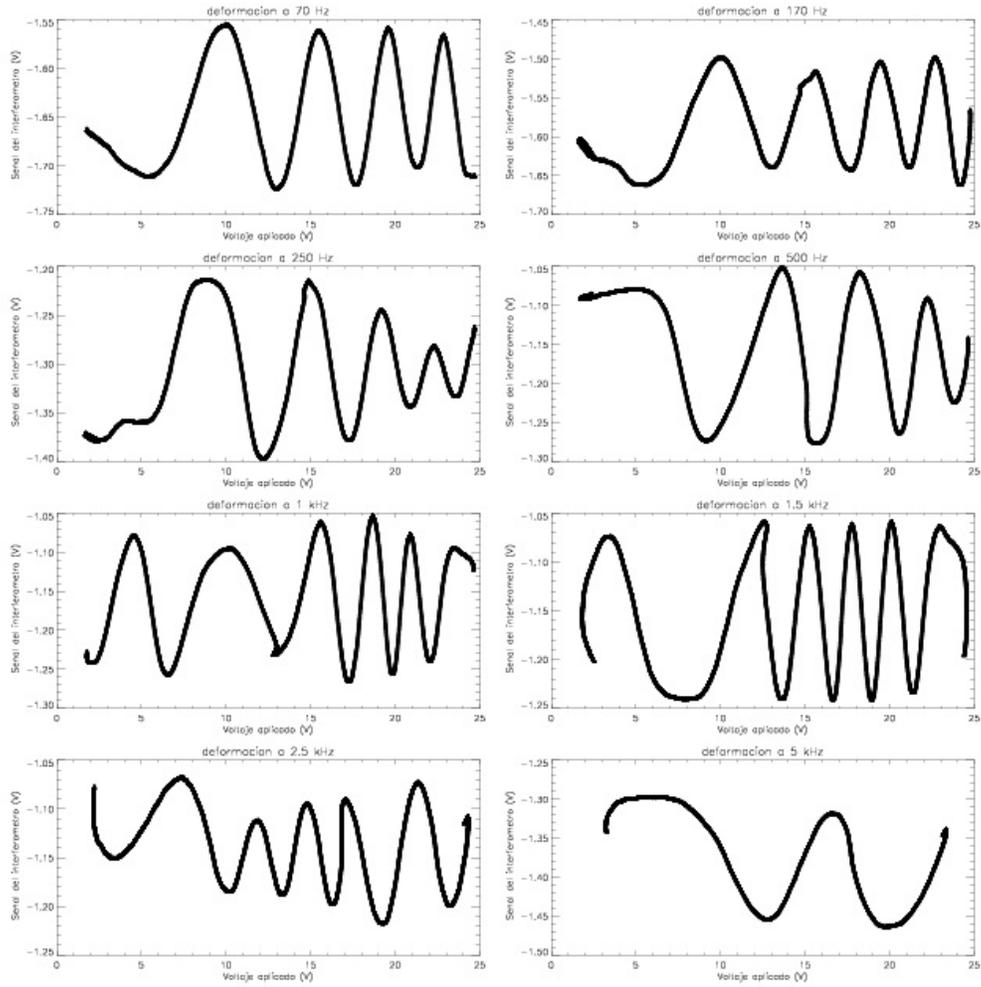


Figura 4.9 Franjas de interferencia por la deformación del espejo de polímero con 20nm aluminio variando la frecuencia.

4.2. Análisis de deformación

En esta sección hacemos una estimación teórica de cuanta fuerza se necesita para deformar el espejo, también, veremos el comportamiento de la deformación de acuerdo al voltaje aplicado y a la distancia de separación entre la parte dinámica del espejo y el electrodo. Por último mostraremos el desempeño de nuestro espejo deformable en

comparación con espejos deformables comerciales.

Todo el análisis en esta sección es con el espejo con parte dinámica de $4 \mu\text{m}$ de polímero y 20 nm de aluminio mostrado en la sección 4.1.3, debido a que tiene mejor desempeño que los mostrados en las secciones 4.1.1 y 4.1.4.

4.2.1. Análisis de fuerza electrostática del actuador

Como mencionamos en el Capítulo 3, para deformar el espejo aplicamos de 0 a 250 V a través de un electrodo y el circuito lo cerramos por la superficie dinámica del espejo deformable (ver Figura 4.10).

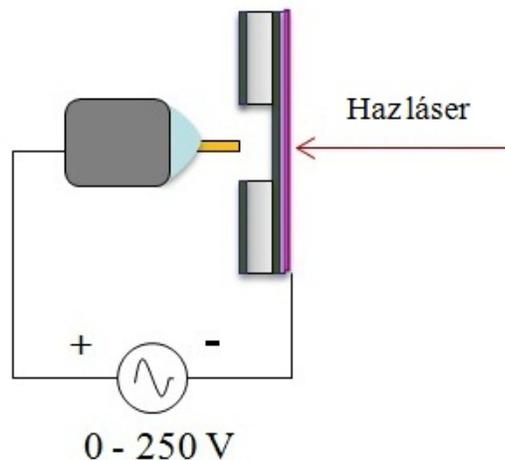


Figura 4.10 Esquema del espejo deformable por campo eléctrico.

Básicamente podemos modelar el campo eléctrico entre el electrodo y la membrana como un capacitor con dos superficies paralelas (ver Figura 4.11), la parte de abajo está fija (electrodo), mientras que la parte de arriba (superficie dinámica del espejo) puede moverse hacia el electrodo al aplicar voltaje.

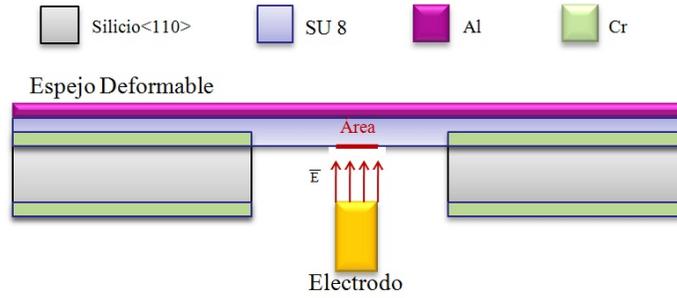


Figura 4.11 Esquema del espejo deformable por campo eléctrico como un capacitor con superficies paralelas.

La energía de potencial eléctrico U asociado con este sistema puede estar expresado como:

$$U = -\frac{1}{2}CV^2, [FV^2] \quad (4.1)$$

en donde V es el voltaje aplicado y C es la capacitancia del sistema que puede ser expresado como:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}, [F] \quad (4.2)$$

donde ε_0 es la permitividad del espacio libre ($\varepsilon_0 = 8.8541878176... \times 10^{-12} F/m$), A es el área de la superficie del electrodo y d es la distancia entre las dos superficies (electrodo - espejo dinámico).

La fuerza electrostática F_d entre las dos superficies está dado por[10]:

$$F_d = \frac{\partial U}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r AV^2}{d^2}, [N] \quad (4.3)$$

donde ε_r (adimensional) es la constante dieléctrica del espacio entre el electrodo y la membrana.

La dimension del área de la superficie la tomaremos del electrodo, que es de donde se aplica el voltaje. El electrodo tiene ~ 1.2 mm de diámetro, la Figura 4.12 muestra la

estimación teórica de cuanta fuerza se está aplicando para deformar el espejo mostrado en la Sección 4.1.3 de este Capítulo. Las distancias que consideraremos van de 100 a 20 μm , que es en donde el espejo tiene una deformación considerable (ver Figura 4.8).

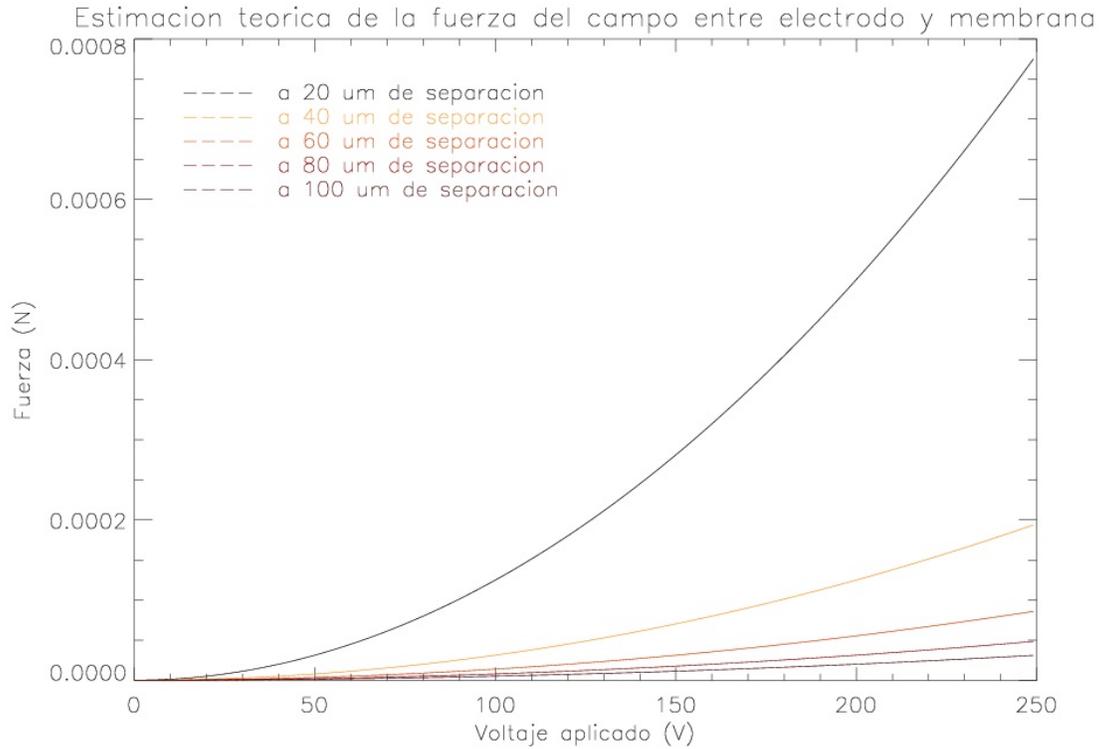


Figura 4.12 Fuerza electrostática teórica para la deflexión del espejo.

De la gráfica mostrada en la Figura 4.12 podemos percatarnos que efectivamente a una distancia mas corta hay un campo mayor, por lo que hay mas deformación del espejo, además, la deformación también incrementa conforme aumenta el voltaje.

4.2.2. Análisis de deformación

En la Sección 4.1.3 obtuvimos la deformación del espejo para diferentes distancias entre el electrodo y la membrana, en esta sección analizaremos el comportamiento de la deformación para la respuesta a 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre el electrodo

y la membrana porque a esas distancias el espejo tiene mejor comportamiento (ver Figura 4.13).

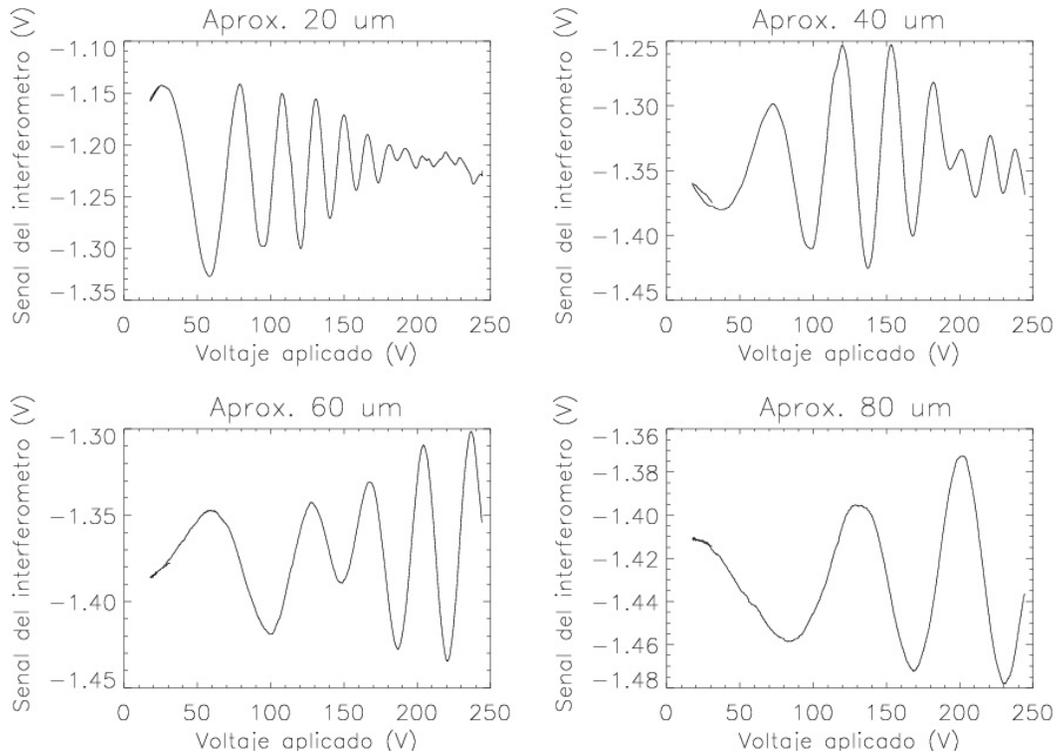


Figura 4.13 Franjas de interferencia por la deformación del espejo para 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre electrodo y membrana.

De acuerdo al número de franjas de interferencia por el desplazamiento del espejo deformable, graficamos la respuesta del espejo con respecto al voltaje que se está aplicando al electrodo (ver Figura 4.14)

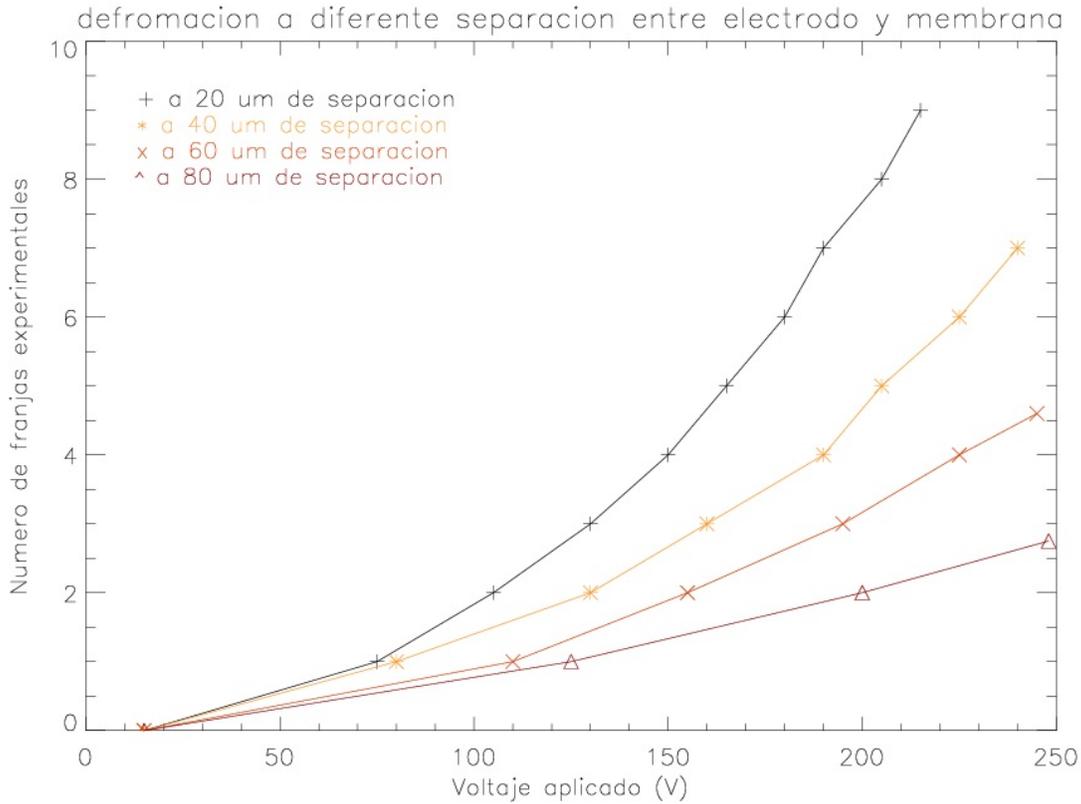


Figura 4.14 Número de franjas de interferencia experimentales para 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre electrodo y membrana.

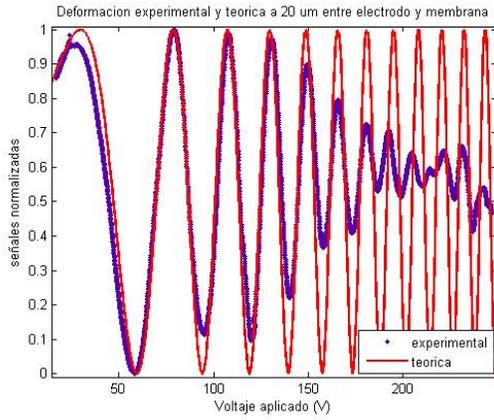
También, sabemos que la ecuación de interferencia de dos ondas planas monocromáticas esta dado por la ecuación 4.4 [1]

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \right) \right], \quad (4.4)$$

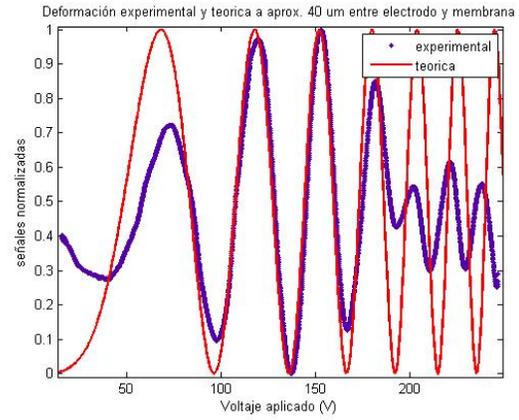
en donde d es la distancia entre dos ondas defasadas.

De acuerdo a la respuesta de la fuerza aplicada para deformar el espejo y al número de franjas de interferencia producidas por el desplazamiento del espejo al aplicar el voltaje en el electrodo (ver Figura 4.12 y 4.14 correspondientemente) observamos que el comportamiento de la deformación es cuadrático con respecto al voltaje aplicado,

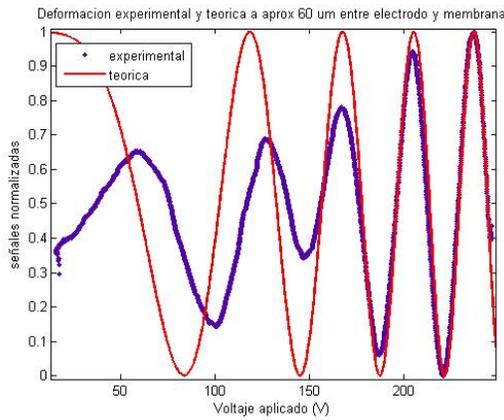
por lo que, para hallar el desplazamiento de la membrana encontramos que $d = cV^2$, en donde c es la constante que determina la deflexión del espejo.



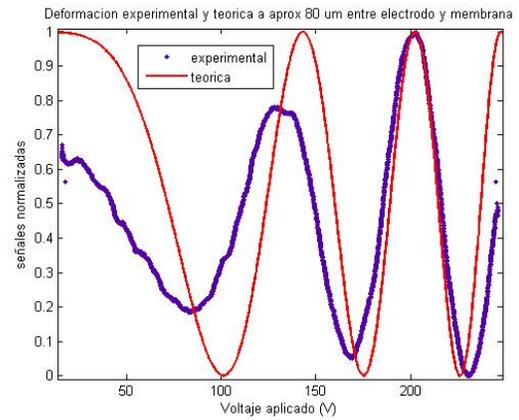
a)



b)



c)



d)

Figura 4.15 Señal de ajuste (roja) a la respuesta de deformación (azul) para 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre electrodo y parte dinámica del espejo deformable.

Para hallar los valores de las constantes para 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre electrodo, primero normalizamos la amplitud de la señal de interferencia (intensidad). La atenuación conforme el voltaje (ver señales en azul de las gráficas de la Figura 4.15) se debe a que el desplazamiento de la superficie dinámica del espejo no es

completamente perpendicular al eje de propagación del haz láser, pero no afecta la deflexión de la parte dinámica del espejo.

Posteriormente, ingresamos los datos a MATLAB® e ingresamos la ecuación 4.4 normalizada para obtener la constante de deflexión "c" para cada distancia de separación entre electrodo y membrana, las ecuaciones 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 son los ajustes teóricos del comportamiento de la deflexión de la membrana para 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre electrodo y membrana correspondientemente (señales en rojo de las gráficas a), b), c) y d) correspondientemente de la Figura 4.15).

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} c_1 V^2 - \frac{\pi}{3} \right) \right], \quad (4.5)$$

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} c_2 V^2 - \pi \right) \right], \quad (4.6)$$

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} c_3 V^2 \right) \right], \quad (4.7)$$

$$I/I_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} c_4 V^2 \right) \right], \quad (4.8)$$

en donde $c_1 = 1.48 \times 10^{-10} [\frac{m}{V^2}]$, $c_2 = 0.85 \times 10^{-10} [\frac{m}{V^2}]$, $c_3 = 5.57 \times 10^{-11} [\frac{m}{V^2}]$ y $c_4 = 3.82 \times 10^{-1} [\frac{m}{V^2}]$.

Ya que obtuvimos la ecuación que describe el comportamiento teórico de las franjas de interferencia por la deflexión para cada separación entre membrana y electrodo, las ecuaciones 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 son las ecuaciones de deflexión para 20, 40, 60 y 80 μm de separación entre electrodo y membrana correspondientemente.

$$d = c_1 V^2, [m] \quad (4.9)$$

$$d = c_2 V^2, [m] \quad (4.10)$$

$$d = c_3 V^2, [m] \quad (4.11)$$

$$d = c_4 V^2, [m] \quad (4.12)$$

La Figura 4.16 describe la deflexión del espejo de polímero SU8 con actuador electrostático, de acuerdo a las ecuaciones 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12.

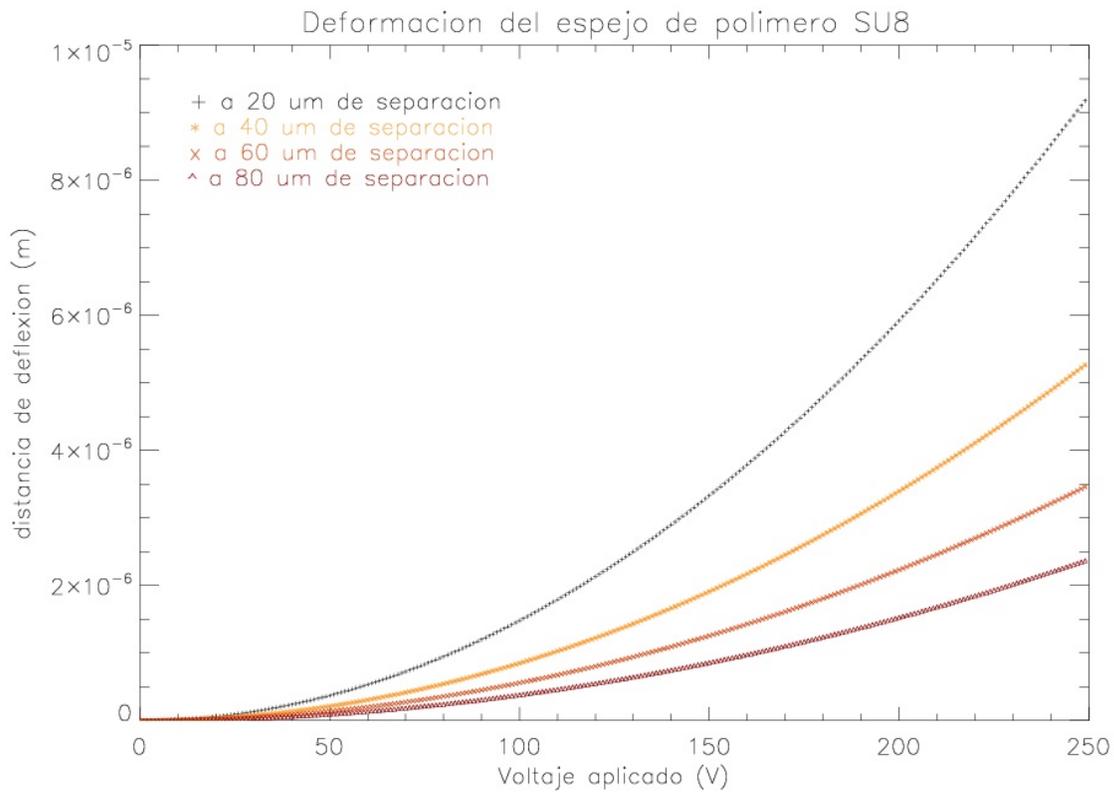


Figura 4.16 Desplazamiento de la parte dinámica del espejo deformable por campo eléctrico usando polímero SU8 .

4.2.3. Comparación con otros fabricantes

En la Sección 2.4 del Capítulo 2 mencionamos algunos fabricantes de espejos deformables por campo eléctrico que utilizan nitruro de silicio o polímero como membrana para la región dinámica del espejo.

La mayoría de estos fabricantes mencionan algunas características de importancia de su espejo como: número de electrodos, separación entre electrodos y membrana ("gap"), módulo de elasticidad de la membrana, recubrimiento de la membrana, etc.

Para hacer una comparación con David L. Dickensheets[3], calculamos cuanto se deformaría el espejo de 4 μm de polímero SU8 y 20 nm de aluminio de espesor a una distancia entre electrodo y membrana de 25 μm y un voltaje de 355 V. Para ello, primero hallamos la ecuación 4.13 por medio del ajuste de un polinomio de tercer grado con las constantes c_1 , c_2 , c_3 y c_4 (ver Capítulo 4 Sección 4.2.2) y su distancia a la cual se calcularon cada una.

$$c(X) = -4.1 \times 10^{-16}X^3 + 9.6 \times 10^{-14}X^2 - 7.6 \times 10^{-12}X + 2.6 \times 10^{-10}. \quad (4.13)$$

en donde X es la distancia de separación entre la región dinámica del espejo y el electrodo.

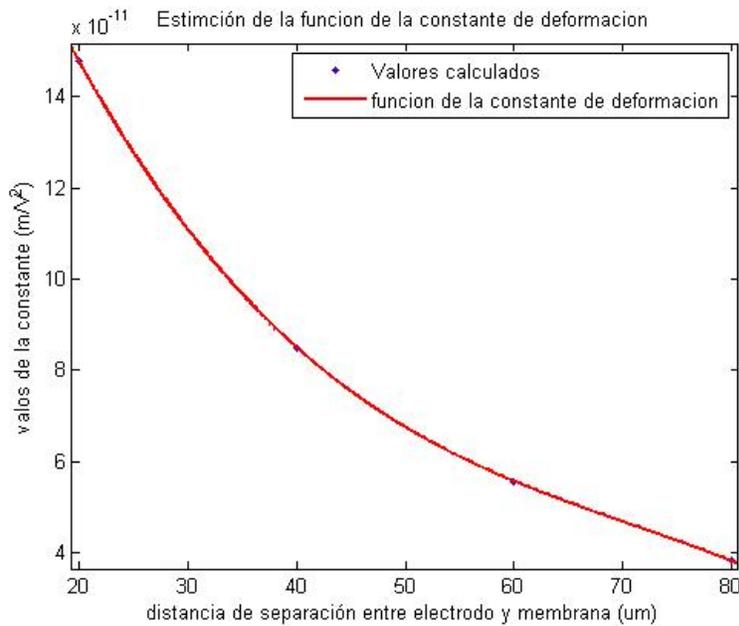


Figura 4.17 Ajuste del polinomio de tercer orden con las constantes c_1 , c_2 , c_3 y c_4 del espejo de de 4 μm de polímero SU8 y 20 nm de aluminio de espesor.

La Figura 4.17 muestra el ajuste de la ecuación 4.13 con las constantes c_1 , c_2 , c_3 y c_4 . Después, calculamos la constante para $X = 25 \mu\text{m}$, entonces, $c = 1.3 \times 10^{-10}[\frac{m}{V^2}]$, sustituyendo en la relación $d = cV^2$ (en donde $V = 355 \text{ V}$) obtenemos que $d = 16\mu\text{m}$.

La Tabla 4.1 nos muestra la comparación entre los diseños de espejos deformables de OKO Technologies[5], de California Institute of Technology (Caltech)[9], de Montana State University(MSU)[4] y el fabricado en nuestro laboratorio (CCADET-UNAM).

Parámetros	OKO Technologies	Caltech	MSU	UNAM
Membrana	Si_3N_4	Si_3N_4	SU8-2002	SU8-2002
Módulo de elasticidad	$\sim 260 \text{ GPa}$	$\sim 260 \text{ GPa}$	$\sim 2 \text{ GPa}$	$\sim 2 \text{ GPa}$
Máxima deflexión	$10 \mu\text{m}$	3 pm	$17 \mu\text{m}$	$16 \mu\text{m}$
<i>gap</i>	no reportado	$20 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m}$
Voltaje aplicado	300 V	300 V	355 V	355 V

Tabla 4.1. Comparación de deflexión con otros fabricantes

Capítulo 5

Conclusión

Hemos demostrado un método simple y efectivo para la fabricación de espejos deformables en comparación con espejos deformables hechos de Si_3N_4 , además, nuestro método incluye sencillos pasos para el ajuste de la rigidez del espejo.

En comparación con trabajos previos que utilizan SU8, nuestro trabajo presenta una flexibilidad satisfactoria a mayor distancia entre electrodo y membrana, y con menor voltaje.

Por otra parte, la Figura 4.12 de la fuerza y la Figura 4.14 de la deflexión del espejo, nos muestran que su comportamiento presenta una relación cuadrática que nos pueden dar una idea del comportamiento del espejo al aplicar diferentes voltajes. En base a éstas estimaciones podemos encontrar el comportamiento del espejo deformable (ecuación 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8).

La estimación de las ecuaciones 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 se ajusta satisfactoriamente a la respuesta experimental de deformación del espejo y nos permite obtener el comportamiento del desplazamiento de la superficie dinámica del espejo, con el cual, podemos ratificar que el comportamiento de la membrana obedece a una relación cuadrática como el espejo mostrado por David L. Dickensheets [4] que también está fabricado con SU8 2002.

El obtener nuestra propia metodología de fabricación nos permite elaborar espejos de acuerdo a nuestras necesidades de aplicación.

5.1. Trabajo a futuro

Aunque el trabajo muestra resultados satisfactorios en la deflexión de la parte dinámica del espejo. Se podría realizar un análisis diferente de la deformación (al mostrado en esta tesis) en toda la superficie del espejo con una cámara.

Por otra parte, mostramos algunas recomendaciones para obtener mejores resultados en el micromaquinado

- El cuarto limpio debe operar al 100 %
- La fabricación de las máscaras para el depósito de cromo se deben realizar de manera más profesional.
- Se debe alinear de manera precisa los planos cristalográficos del silicio con las máscaras para el ataque químico del silicio.

También se debe fabricar el electrodo (o electrodos), por medio de "*Lift-off*" [12] para obtener mejor planicidad en su superficie y una mejor precisión en la separación entre el electrodo y la membrana.

Para poder alinear el espejo en el Interferómetro de Michelson (u otro sistema óptico) se debe realizar una montura adecuada para el espejo deformable.

Estas recomendaciones van de la mano con tener en cuenta la aplicación que va a tener el espejo deformable y así realizar el diseño apropiado de las dimensiones del espejo y utilizar alguna de las metodologías mostradas en éste trabajo.

Bibliografía

- [1] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley and Sons, Inc, 1991.
- [2] Brigham Young University, <http://www.cleanroom.byu.edu/processes.phtml>, 2011.
- [3] Laurent Vabre. Enrique J. Fernández, *Adaptive optics with a magnetic deformable mirror: applications in the human eye*, Optical Society of America **14** (October 2006).
- [4] Sarah Lukes David L. Dickensheets Erwin Dunbar, Matthew Leone, *Polymer deformable membrane mirrors for focus control using su-8 2002*, International Conference on Optical MEMs and Nanophotonics.
- [5] Flexible Optical B.V., <http://www.okotech.com>, 2011.
- [6] Hecht Eugene, *Óptica*, Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [7] A. H. Greenaway J. Garduño-Mejía and D. T. Reid., *Designer femtosecond pulses using adaptive optics*, Optical Society of America **11** (August 2003).
- [8] Julio Castejón, Isabel Castejón, Rafael Magán, *Montajes e Instalaciones*.
- [9] Randall K.; Kaiser William J.; Kenny Thomas W.; Norton Robert L.; Vote Erika C. Linda M. Miller.;Agronin, Michael L.; Bartman, *Fabrication and charac-*

terization of a micromachined deformable mirror for adaptive optics applications, Proc. SPIE **1945**.

- [10] Zamkotsian F. Liotard A., *Static and dynamic micro deformable mirror characterization by phase-shifting and time-averaged interferometry*, In: Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics (ICSO 2004) **B. Warmbein. ESA SP-554, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-865-4, 2004** (30 March - 2 April 2004), 801 – 808.
- [11] Ljubisa Ristic, *Sensor Technology and Devices*, Artech House, 1994.
- [12] Marc J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication: the science of miniaturization*, CRC PRESS LLC, 2002.
- [13] MicroChem Corp., <http://www.microchem.com/Prod-SU82000.htm>, 2011.
- [14] Photonics Spectra, <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=21102>, 2011.
- [15] R.Gaughan., *Miniature deformable mirrors bring adaptive optics within reach*, Photonics Spectra.
- [16] S.M.Sze, *Semiconductor Sensor*, John Wiley and Sons, Inc, 1994.
- [17] Thorlabs, Inc., http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3208, 2011.
- [18] A. M. WEINER., *Femtosecond optical pulse shaping and processing*, Prog. Quant. Electr. **19** (1995), 161–237.
- [19] A. M. Weiner, *Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators*, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **71** (May 2000).

Apéndice A



NANO™ SU-8

Negative Tone Photoresist Formulations 2-25

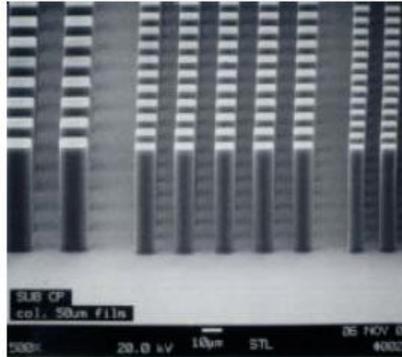
- High aspect ratio imaging with near vertical side walls
- Near UV (350-400nm) processing
- Film thicknesses from 1 to >200µm with single spin coat processes
- Superb chemical and temperature resistance

SU-8 is a high contrast, epoxy based photoresist designed for micromachining and other microelectronic applications, where a thick chemically and thermally stable image is desired. The exposed and subsequently cross-linked portions of the film are rendered insoluble to liquid developers. SU-8 has very high optical transparency above 360nm, which makes it ideally suited for imaging near vertical sidewalls in very thick films. SU-8 is best suited for permanent applications where it is imaged, cured and left in place.

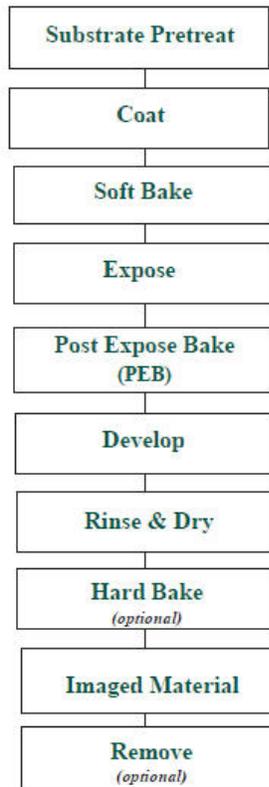
Process Guidelines

SU-8 is most commonly processed with conventional near UV (350-400nm) radiation, although it may be imaged with e-beam or x-ray. i-line (365nm) is recommended. Upon exposure, cross-linking proceeds in-two-steps (1) formation of a strong acid during the exposure process, followed by (2) acid-initiated, thermally driven epoxy cross-linking during the post exposure bake (PEB) step.

A normal process is: spin coat, soft bake, expose, post expose bake (PEB) and develop. A controlled hard bake is recommended to further cross-link the imaged SU-8 structures when they it will remain as part of the device. The entire process should be optimized for the specific application. A baseline process is given here to be used as a starting point.



5µm, 10µm and 20µm post arrays in a 50µm thick film.



Substrate Pretreatment

To obtain maximum process reliability, substrates should be clean and dry prior to applying the SU-8 resist. Start with a solvent cleaning, or a rinse with dilute acid, followed by a DI water rinse. Where applicable, substrates should be subjected to a piranha etch / clean (H_2SO_4 & H_2O_2). To dehydrate the surface, bake at 200°C for 5 minutes on a hotplate. For applications that require electroplating and subsequent removal of SU-8 apply MicroChem's OmniCoat prior to processing SU-8.

Coat

SU-8 resists are designed to produce low defect coatings over a very broad range of film thickness. The film thickness versus spin speed data displayed in Table 1. and Figure 1. provide the information required to select the appropriate SU-8 resist and spin conditions, to achieve the desired film thickness.

The recommended coating conditions are:

- (1) STATIC Dispense: Approximately 1ml of SU-8 per inch of substrate diameter.
- (2) Spread Cycle: Ramp to 500 rpm at 100 rpm/second acceleration. This will take 5 seconds.
- (3) Spin Cycle: Ramp to final spin speed at an acceleration of 300 rpm/second and hold for a total of 30 seconds.

Product Name	Viscosity (cSt)	Thickness (µm)	Spin Speed (rpm)
		1.5	3000
SU-8 2	45	2	2000
		5	1000
		5	3000
SU-8 5	290	7	2000
		15	1000
		10	3000
SU-8 10	1050	15	2000
		30	1000
		15	3000
SU-8 25	2500	25	2000
		40	1000

Table 1. Thickness vs. spin speed data for selected SU-8 resists.

** Approximate

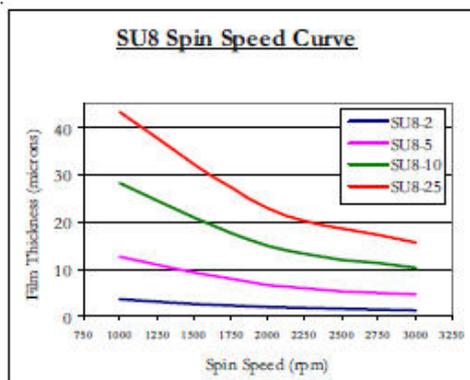


Figure 1. Spin speed vs. thickness curves for selected SU-8 resists.

Soft Bake

After the resist has been applied to the substrate, it must be soft baked to evaporate the solvent and densify the film. SU-8 is normally baked on a level hot plate, although convection ovens may be used. The following bake times are based on contact hot plate processes. Bake times should be optimized for proximity and convection oven bake processes since solvent evaporation rate is influenced by the rate of heat transfer and ventilation.

For best results, ramping or stepping the soft bake temperature is recommended. Lower initial bake temperatures allow the solvent to evaporate out of the film at a more controlled rate, which results in better coating fidelity, reduced edge bead and better resist -to-substrate adhesion. Refer to Table 2. for TWO STEP contact hot plate process recommendations.

Product Name	Thickness (µm)	Pre-bake @ 65°C	Softbake @ 95°C
	1.5	1	1
SU-8 2	2	1	3
	5	1	3
	5	1	3
SU-8 5	7	2	5
	15	2	5
	10	2	5
SU-8 10	15	2	5
	30	3	7
	15	2	5
SU-8 25	25	3	7
	40	5	15

Table 2. Recommended soft bake parameters

Expose

SU-8 is optimized for near UV (350-400nm) exposure. i-line exposure tools are recommended. SU-8 is virtually transparent and insensitive above 400nm but has high actinic absorption below 350nm. This can be seen in Figure 2. Excessive dose below 350nm may, therefore, result in over exposure of the top portion of the resist film, resulting in exaggerated negative sidewall profiles or T-topping. The optimal exposure dose will depend on film thickness (thicker films require higher dosage) and process parameters. The exposure dose recommendations in Table 3, are based on source intensity measurements taken with an i-line (365nm) radiometer and probe.

Expose tip: When using a broad spectral output source, for best imaging results, i.e. straightest sidewalls, filter out excessive energy below 350nm.

Catastrophic adhesion failure, severely negative sidewalls and excessive cracking often indicate an under cross-linking condition. To correct the problem, increase the exposure dose and/or increase the post exposure bake (PEB) time.

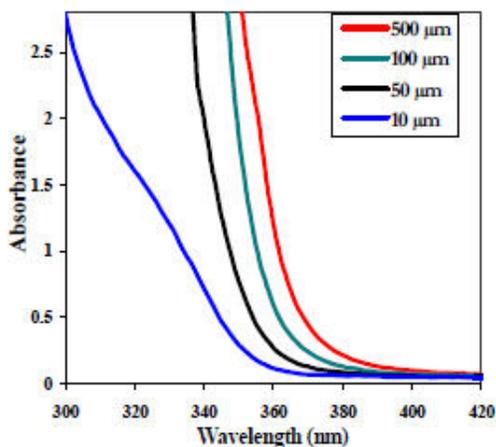


Figure 2. SU-8 absorbance vs. film thickness

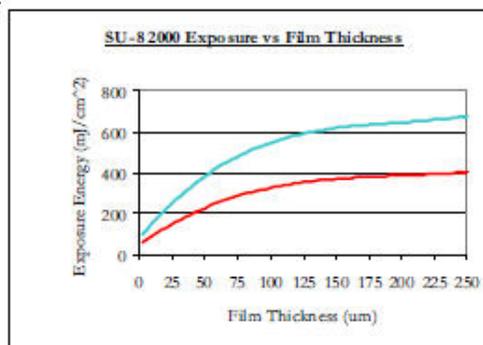


Table 3. Recommended exposure dose processes

Post Exposure Bake

Following exposure, a post expose bake (PEB) must be performed to selectively cross-link the exposed portions of the film. This bake can be performed either on a hot plate or in a convection oven. Optimum cross-link density is obtained through careful adjustments of the exposure and PEB process conditions. The bake recommendations below are based on results obtained with a contact hot plate.

PEB tip: SU-8 is readily cross-linked and can result in a highly stressed film. To minimize stress, wafer bowing and resist cracking, a slow ramp or TWO STEP contact hot plate process, as shown in Table 4., is recommended. Rapid cooling after PEB should be avoided.

Product Name	Thickness (μms)	PEB 1 (@65° C)	PEB 2 (@95° C)
SU-8 2	1.5	1	1
	2	1	1
	5	1	1
SU-8 5	5	1	1
	7	1	1
SU-8 10	15	1	2
	10	1	2
	15	1	2
SU-8 25	30	1	3
	15	1	2
	25	1	3
	40	1	4

Table 4. Recommended post exposure bake parameters

Develop

SU-8 resists have been optimized for use with MicroChem's SU-8 Developer. Immersion, spray or spray-puddle processes can be used. Other solvent based developers such as ethyl lactate and diacetone alcohol may also be used. Strong agitation is recommended for high aspect ratio and/or thick film structures. Recommended develop times are given in Table 5. for immersion processes. These proposed develop times are approximate, since actual dissolution rates can vary widely as a function of agitation rate, temperature and resist processing parameters.

Product Name	Thickness (µm)	Development (minutes)
	1.5	1
SU-8 2	2	1
	5	1
	5	1
SU-8 5	7	1
	15	3
	10	2
SU-8 10	15	3
	30	5
	15	3
SU-8 25	25	4
	40	6

Table 5. Recommended develop processes

Rinse and Dry

Following development, the substrate should be rinsed briefly with isopropyl alcohol (IPA), then dried with a gentle stream of air or nitrogen.

Rinse tip: If a white film is produced during rinse, this is an indication that the substrate has been under developed. Simply immerse or spray the substrate with SU-8 developer to remove the film and complete the development process. Repeat the rinse step

Hard Bake (cure)

SU-8 has good mechanical properties, therefore hard bakes are normally not required. For applications where the imaged resist is to be left as part of the final device, the resist may be ramp/step hard baked between 150-200°C on a hot plate or in a convection oven to further cross link the material. Bake times vary based on type of bake process and film thickness.

Remove

SU-8, after expose and PEB, is a highly cross-linked epoxy, which makes it extremely difficult to remove with conventional solvent based resist strippers. MicroChem's Remover PG will swell and lift off minimally cross-linked SU-8 2000.

However, if OmniCoat has been applied immersion in Remover PG should effect a clean and thorough Lift-Off of the SU-8 2000 Material. It will not remove fully cured or hard baked SU-8 2000 without the use of OmniCoat. Alternate removal processes include immersion in oxidizing acid solutions such as piranha etch / clean, plasma ash, RIE, laser ablation and pyrolysis.

To remove minimally cross-linked SU-8 2000, or if using OmniCoat, with Remover PG, heat the bath to 50-80°C and immerse the substrates for 30-90 minutes. Actual strip time will depend on resist thickness and cross-link density. For more information on MicroChem OmniCoat and Remover PG please see the relevant product data sheets.

Storage

Store SU-8 resists upright in tightly closed containers in a cool, dry environment away from direct sunlight at a temperature of 40-70°F(4-21°C). Store away from light, acids, heat and sources of ignition. Shelf life is twelve months from date of manufacture.

Disposal

SU-8 resists may be included with other waste containing similar organic solvents to be discarded for destruction or reclaim in accordance with local state and federal regulations. It is the responsibility of the customer to ensure the disposal of SU-8 resists and residues made in observance all federal, state, and local environmental regulations.

Environmental, Health and Safety

Consult product Material Safety Data Sheet before working with SU-8 resists. Handle with care. Wear chemical goggles, chemical gloves and suitable protective clothing when handling SU-8 resists. Do not get into eyes, or onto skin or clothing. Use with adequate ventilation to avoid breathing vapors or mist. In case of contact with skin, wash affected area with soap and water. In case of contact with eyes, rinse immediately with water and flush for 15 minutes lifting eyelids frequently. Get emergency medical assistance.

The information is based on our experience and is, we believe to be reliable, but may not be complete. We make no guarantee or warranty, expressed or implied, regarding the information, use, handling, storage, or possession of these products, or the application of any process described herein or the results desired, since the conditions of use and handling of these products are beyond our control.



1254 Chestnut Street
Newton, MA 02464

tel: (617)965-5511 fax: (617)965-5818

email: mcc@microchem.com www.microchem.com

Apéndice B



POWER OPERATIONAL AMPLIFIERS

PA79

POWER, PERFORMANCE, VALUE
Precision ICs

WWW.APEXMICROTECH.COM (800) 546-APEX (800) 546-2739

FEATURES

- A UNIQUE (Patent Pending) TECHNIQUE FOR VERY LOW QUIESCENT CURRENT
- OVER 350 V/ μ S SLEW RATE
- WIDE SUPPLY VOLTAGE
 - Single Supply: 20V to 350V
 - Split Supplies: +/- 10V to +/- 175V
- OUTPUT CURRENT – Per Amplifier – 150mA cont. ; 200mA Pk
- UP TO 26 WATT DISSIPATION CAPABILITY (DUAL)
- OVER 200 kHz POWER BANDWIDTH



20-PIN PSOP PACKAGE STYLE DK

APPLICATIONS

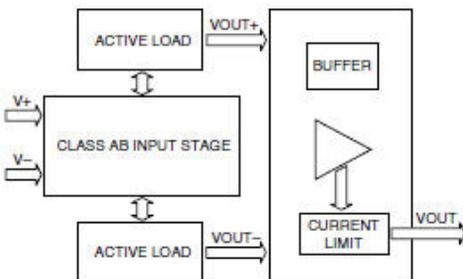
- PIEZOELECTRIC POSITIONING AND ACTUATION
- ELECTROSTATIC DEFLECTION
- DEFORMABLE MIRROR ACTUATORS
- CHEMICAL AND BIOLOGICAL STIMULATORS

DESCRIPTION

The PA79 is a dual high voltage, high speed Precision IC power op amp with performance and unique features not found previously in any commercially available OpAmp. This approach provides a cost-effective, high density solution to applications where multiple amplifiers are required.

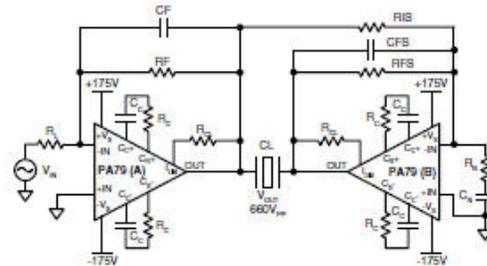
Novel input stage design of this amplifier provides extremely high slew rates in pulse applications while maintaining low quiescent current of under 1mA. This novel input stage also has the effect of adding variables to the power response and slew rate characteristics of the amplifier. To a lesser degree, there are also input related effects on unity gain bandwidth and phase. It is important to note that the slew rate is a strong function of input voltage amplitude. **It should be noted that the package tab needs to be connected to a stable reference such as GND for high slew rates. Please refer to special**

BLOCK DIAGRAM



considerations section for details.

The output stages are well protected with user defined current limit although the Safe Operating Area (SOA) must be observed for reliable protection. Proper heatsinking is required for maintaining maximum reliability. External phase compensation provides the user with great flexibility in trading gain, stability and bandwidth.



TYPICAL APPLICATION

The typical application diagram shows a bridge connection of the two amplifiers inside a dual PA79 and provides output voltage swing twice that of one amplifier. Two possible situations where there is an advantage would be in applications with low supply voltages, or applications that operate amplifiers near their maximum voltage ratings in which a single amplifier could not provide sufficient drive. The bridge connection also effectively doubles the slew rate, and non-linearity becomes

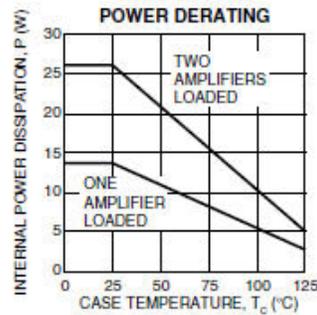
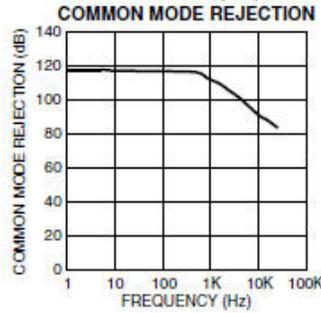
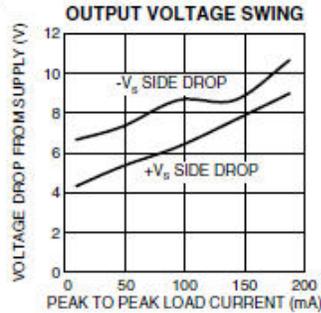
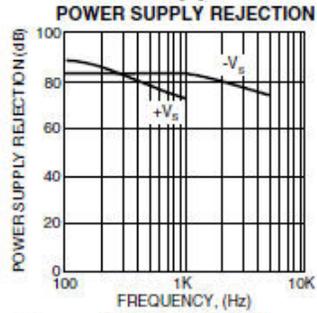
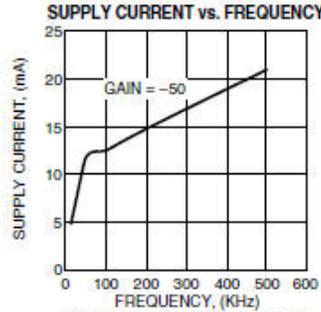
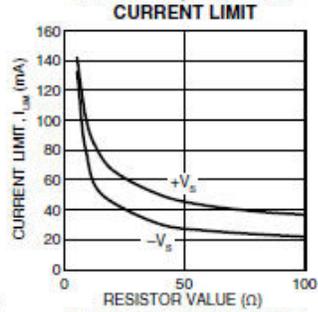
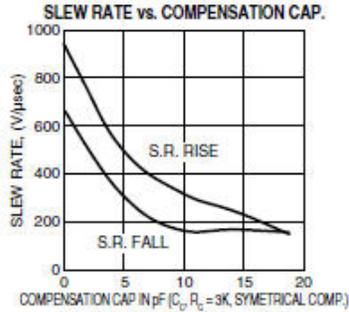
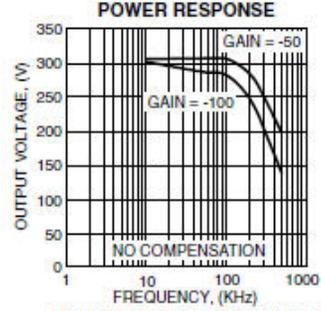
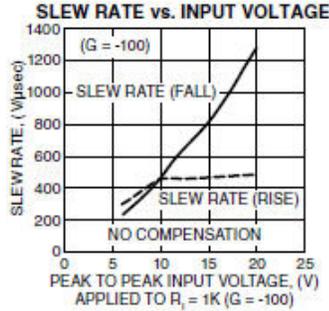
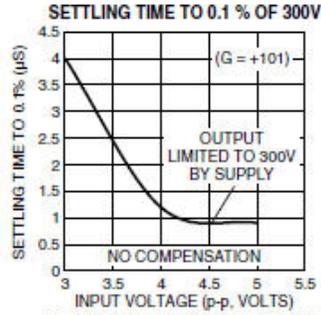
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SUPPLY VOLTAGE, $+V_s$ to $-V_s$	350V
OUTPUT CURRENT, peak (200ms)	200mA, within SOA
POWER DISSIPATION, internal, DC	14W Single
POWER DISSIPATION, internal, DC	26W Dual
INPUT VOLTAGE, Differential	$\pm 15V$
INPUT VOLTAGE, Common Mode	$\pm V_s$
TEMPERATURE, junction ⁷	150°C
TEMPERATURE RANGE, storage	-55 to 125°C
OPERATING TEMPERATURE, case	-40 to 125°C

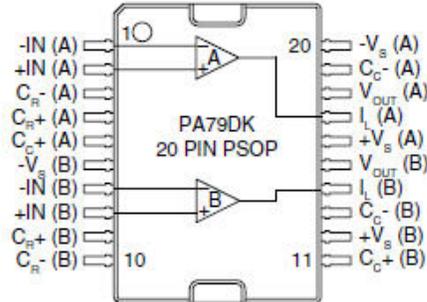
SPECIFICATIONS

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP	MAX	UNITS
INPUT					
OFFSET VOLTAGE		-40	8	40	mV
OFFSET VOLTAGE vs. temperature	0 to 125°C (Case Temperature)		-63		$\mu V/^{\circ}C$
OFFSET VOLTAGE vs. supply				32	$\mu V/V$
BIAS CURRENT, initial			8.5	200	pA
OFFSET CURRENT, initial			12	400	pA
INPUT RESISTANCE, DC			10^9		Ω
COMMON MODE VOLTAGE RANGE, pos.			$+V_s - 2$		V
COMMON MODE VOLTAGE RANGE, neg.			$-V_s + 5.5$		V
COMMON MODE REJECTION, DC		90	118		dB
NOISE	700KHz		418		μV RMS
NOISE, V_o NOISE			500		nV/ \sqrt{Hz}
GAIN					
OPEN LOOP @ 1Hz		89	120		dB
GAIN BANDWIDTH PRODUCT @ 1MHz			1		MHz
PHASE MARGIN	Full temperature range		50		$^{\circ}$
OUTPUT					
VOLTAGE SWING	$I_o = 10mA$		$ V_o - 2$		V
VOLTAGE SWING	$I_o = 100mA$		$ V_o - 8.6$	$ V_s - 12$	V
VOLTAGE SWING	$I_o = 150mA$		$ V_o - 10$		V
CURRENT, continuous, DC		150			mA
SLEW RATE	Package Tab Connected to GND	100	350		V/ μS
SETTLING TIME, to 0.1%	5V Step (No Compensation)		1		μS
POWER BANDWIDTH, 300V _{p,p}	$+V_s = 160V, -V_s = -160V$		200		kHz
OUTPUT RESISTANCE, No Load	$R_{o} = 6.2\Omega$		44		Ω
POWER SUPPLY					
VOLTAGE		± 10	± 150	± 175	V
CURRENT, quiescent ⁸	$\pm 150V$ Supply	0.2	0.7	2.5	mA
THERMAL					
RESISTANCE, DC, junction to case, dual ⁶	Full temperature range		4.4	4.8	$^{\circ}C/W$
RESISTANCE, DC, junction to case, single	Full temperature range		8.3	9.1	$^{\circ}C/W$
RESISTANCE, junction to air	Full temperature range		25		$^{\circ}C/W$
RESISTANCE, junction to air	Full temperature range		19.1		$^{\circ}C/W$
TEMPERATURE RANGE, case		-40		125	$^{\circ}C$

- NOTES: 1. Unless otherwise noted: TC = 25°C, DC input specifications are \pm value given, power supply voltage is typical rating.
 2. Long term operation at the maximum junction temperature will result in reduced product life. Derate power dissipation to achieve high MTTF.
 3. $+V_s$ and $-V_s$ denote the positive and negative supply voltages of the output stage.
 4. Rating applies if output current alternates between both output transistors at a rate faster than 60Hz.
 5. Supply current increases with signal frequency. See graph on page 4. Applies to each amplifier.
 6. Rating applies when the heatslug of the DK package is soldered to a minimum of 1 square inch foil area of a printed circuit board.
 7. Rating applies with the JEDEC conditions outlined in the Heatsinking section of this datasheet.
 8. Rating applies when power dissipation is equal in two amplifiers.



EXTERNAL CONNECTIONS

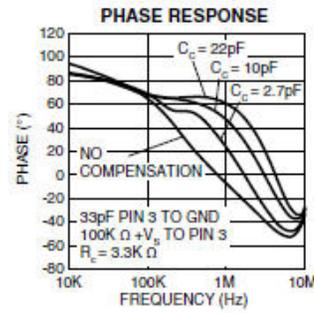
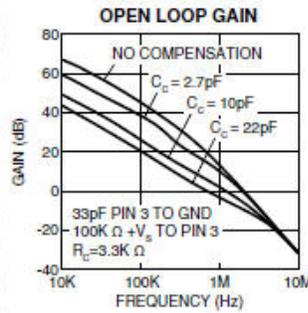


NOTES:

1. The package heat slug needs to be connected to a stable reference such as gnd for high slew rates. Please refer to special considerations section for details.
2. Supply bypassing required for $-V_s$ and $+V_s$.
3. For C_c and R_c values refer to power supply biasing section.
4. Dimple and ESD triangle denotes pin 1.

SMALL SIGNAL GAIN AND PHASE PLOTS

The input signal amplitude to the PA79 amplifier is related to the overall phase margin and unity gain bandwidth. For very small signal amplitudes the amplifier phase margin is negative and it shows instability. If small signal stability is desired a constant current source of 500 uA (or resistor for constant supply voltage) needs to be added externally between C_{c-} and $+V_s$. This current source has minor effects on output offset voltage but helps immensely with small signal stability. The following gain and phase plots have been generated with a 100k resistor (fixed dual supply voltage $\pm 50V$) between C_{c-} and $+V_s$. Please note that the unity gain bandwidth and phase margin improves with larger signal amplitude because of the unique differential amplifier stage in the PA79.



SAFE OPERATING AREA

The MOSFET output stage of the PA79 is not limited by second breakdown considerations as in bipolar output stages. Only thermal considerations and current handling capabilities limit the SOA. The output stage is protected against transient flyback by the parasitic body diodes of the output stage MOSFET structure. However, for protection against sustained high energy flyback external fast-recovery diodes must be used.

