

CAPÍTULO V

Análisis De Resultados

5.1 Propiedades del Polisilicio

En aplicaciones que requieren de micromaquinado, se utilizan películas delgadas de silicio como material estructural y, como es difícil construir dichas películas de un solo cristal de silicio, los dispositivos se fabrican a partir de silicio policristalino mejor conocido como polisilicio.

Las propiedades mecánicas de las películas de polisilicio dependen mayormente del proceso utilizado en la deposición. La tensión residual puede controlarse casi completamente variando la presión y la temperatura de deposición, como se muestra en la figura 5.1.

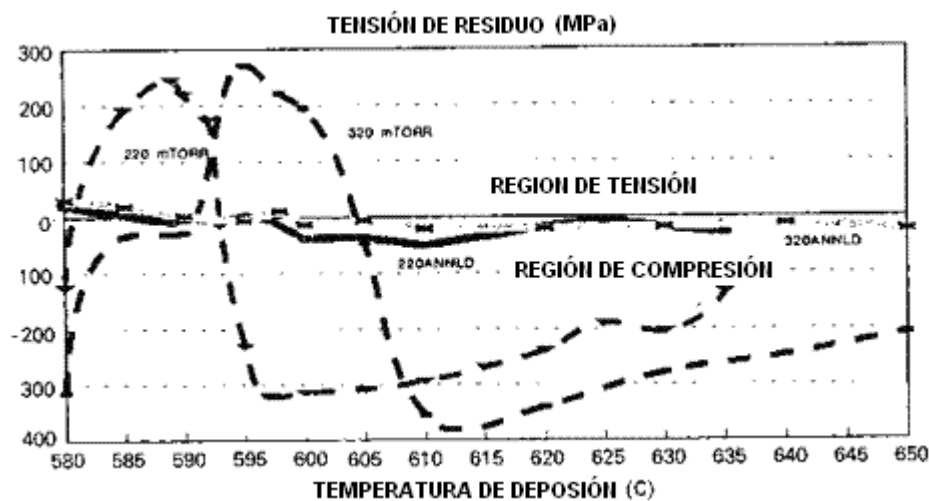


Figura 5.1 Gráfico de la tensión residual

La fuerza del polisilicio es menos conocida. Diferentes investigadores han reportado valores del módulo de Young en rangos de entre 140 y 210 Gpa, que dependen de la estructura cristalina y su orientación. Sin embargo, recientes investigaciones indican que el módulo de Young depende en gran medida de las condiciones de deposición. Las películas delgadas también dependiendo de su orientación, muestran una gran susceptibilidad a la temperatura.

Dado que una película delgada ideal no debe mostrar ninguna dependencia en sus características mecánicas, los investigadores han encontrado que la deposición de películas delgadas a 590 °C, que es la temperatura de transición entre el polisilicio y el silicio amorfo, es un método efectivo para producir películas de polisilicio isotrópicas. A esta temperatura el silicio amorfo se re-cristaliza durante la alineación, lo que produce películas con un módulo de Young casi uniforme de 165 GPa.

En materiales policristalinos la fuerza de fractura depende de dos factores, del tamaño de la oblea d , y la energía superficial de fractura γ_s . Esto proviene del hecho de que el tamaño de una dislocación es generalmente gobernado por el tamaño de la oblea, que, por la ecuación de Griffith, muestra que la fuerza de fractura de este material es:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{4E\gamma_s}{\pi d}} \quad (5.1)$$

Donde σ_f es el esfuerzo de la placa, d es el tamaño de la grieta y E es el módulo de Young.

Como se muestra en la ecuación, la fuerza de fractura es también dependiente de la energía superficial de fractura, γ_s . Para granos de policristales pequeños, la energía necesaria para fracturar la superficie del grano incrementa proporcionalmente al tamaño del grano. Como consecuencia, granos más grandes serán más fuertes debido a la energía creciente necesaria para generar una grieta a través del material.

En varios estudios, la fuerza media de fractura del polisilicio se encuentra entre 2 a 3 GPa. Diversas investigaciones han arrojado que en diferentes muestras de fracturas del polisilicio, tienen un módulo de Weibull similar al del silicio monocristalino, que indicaría una confiabilidad similar para los dos materiales.

La siguiente tabla lista las propiedades físicas principales del polisilicio, las cuales se tomaron como parámetro de diseño y validación del modelo.

Tabla 5.1 Propiedades físicas del polisilicio

| Propiedad | Valor |
|------------------------------------|----------------------------|
| Densidad | 2330 kg/m ³ |
| Calor específico | 753 J/kg C |
| Conductividad térmica | 125 W/m K |
| Módulo de Young | 169 +/- 6 GPa |
| Fuerza de elasticidad | 0.22 +/- 0.01 |
| Relación de Poisson | 1.20 +/- 0.15 GPa |
| Coefficiente de expansión elástica | 9.4 x 10 ⁻⁶ / C |

5.2 El ángulo de Inclinación y la Linealidad

En el capítulo anterior se pueden observar los resultados que se obtuvieron de la curva de transferencia de ángulo-voltaje, que tiene un comportamiento lineal, de este modo, como se declaró anteriormente, la ventaja principal de este microespejo es que puede alcanzar ángulos lineales de escalamiento, además de que para obtener esos ángulos, la placa del microespejo no correrá el riesgo de chocar con la superficie de nitruro que sostiene al sistema.

Obtener un comportamiento lineal fue posible al aplicar escalones de voltaje de aumento constante a los electrodos individualmente activados. De tal modo, que en el primer electrodo se aplicó una diferencia de voltaje mínima, la cual fue incrementando hasta llegar a un valor máximo; mientras que en el segundo electrodo, se realizó lo mismo pero a la inversa, es decir, se inició con un voltaje máximo el cual disminuyó hasta llegar a un valor mínimo.

El precio más grande que se debe de pagar es que para obtener una relación lineal entre el ángulo y el voltaje, es el control simultáneo de incremento de voltaje en el primer electrodo y de disminución de voltaje en el segundo, además que se tiene que comenzar con un valor absoluto de voltaje idéntico en ambos electrodos, para evitar vibraciones indeseables y desestabilización del sistema.

De esta manera, con la finalidad de implementar una estrategia de control en el circuito de accionamiento, se necesitan circuitos divisores de voltaje que puedan utilizarse para proporcionar voltajes lineales de escalamiento a los electrodos. De tal modo que, si lo que se requiere es un ángulo de inclinación determinado, se puede recurrir a este sistema de control y aplicar los valores de voltaje predeterminados en cada electrodo, para cada ángulo.

Sin embargo, si el dispositivo es controlado utilizando un circuito de accionamiento con incremento y/o disminución de voltaje constantes, se pueden lograr ángulos de inclinación de valores intermedios a los obtenidos al aplicar los escalones de voltaje. Esto significa que la resolución del ángulo de inclinación es superior que en modo de escalones de voltaje.

Otra ventaja que tiene el diseño del microespejo torsional propuesto, es que a valores máximos de voltaje se obtuvieron valores de ángulos máximos de inclinación de 43.130° , lo que aumenta la capacidad de reflexión de los haces lumínicos que lleguen a la superficie del espejo y por tanto, al contar con una amplia gama de valores de voltaje, la resolución del microespejo aumenta.

5.3 Modos de Vibración

En el capítulo 3 se definieron las ecuaciones para la frecuencia de vibración del microespejo y sus vigas torsionales.

Por tanto, se tiene que define que la masa de la placa central M se define por:

$$M = 2\rho Wt(P_M - l_v)$$

$$M = 2(2330 * 10^3)(300 * 10^{-6})(2 * 10^{-6}) \left(\left(\frac{600 * 10^{-6} + 200 * 10^{-6}}{2} \right) - 100 * 10^{-6} \right) = 0.839 * 10^{-6} \text{ kg}$$

Donde ρ es la resistividad del material y si la estructura está hecha de silicio, entonces $\rho=2330 \text{ Kg/m}^3$ y $P_M=(l+L)/2$, que es el punto medio del largo total de la estructura del microespejo torsional

De igual modo, de la ecuación 3.42 de frecuencia de vibración de la estructura se desprende que

$$\omega = \sqrt{\frac{2Ewt^3}{Ml_v^3}} = \sqrt{\frac{2(165 * 10^9)(2 * 10^{-6})(2 * 10^{-6})^3}{(0.839 * 10^{-6})(100 * 10^{-6})^3}} = \sqrt{\frac{5.28 * 10^{-12}}{8.39 * 10^{-19}}} = 2508.626 \text{ Hz}$$

Donde E representa al módulo de Young, t y w son el grosor de las vigas y la placa respectivamente.

Por lo tanto, dados los resultados de las frecuencias obtenidas en la simulación se puede observar que están por debajo de los valores permitidos de frecuencias de vibración, por lo que el microespejo no entrará en frecuencia de resonancia que origine fallas catastróficas en el sistema.

5.4 El Modelo Físico

Para la construcción del modelo físico, se utilizó el software de diseño L-Edit en el cual se detalló el proceso PolyMUPMS de las máscaras que efectivamente se utilizaron en la construcción del modelo físico y se muestran a continuación en la figura 5.2, donde los cuadros grandes son los cojincillos para conectar el dispositivo.

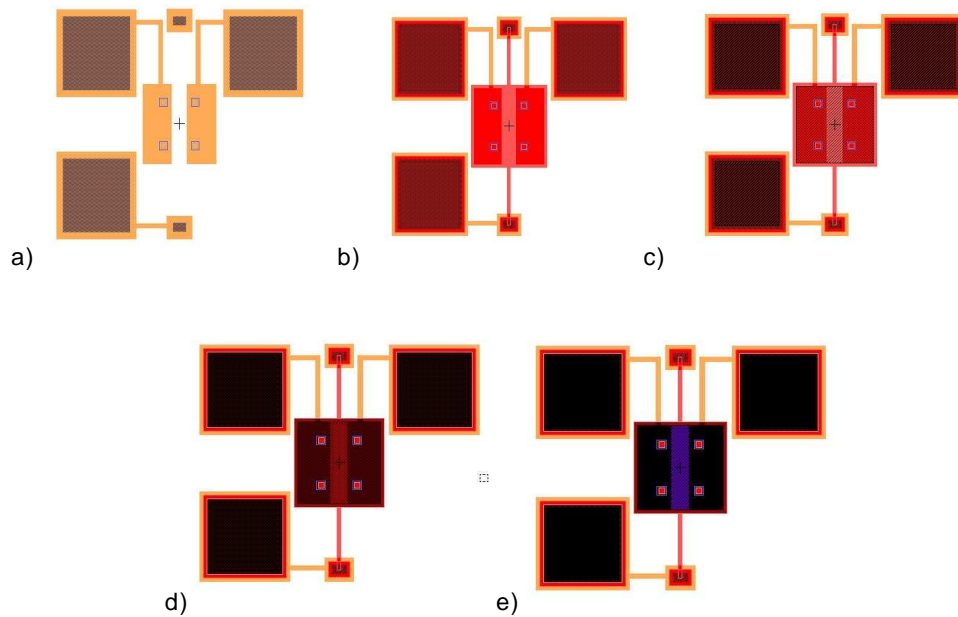


Figura 5.2 a) Cojincillos de conexión y los electrodos (Poli 0)
 b) Anchor 1 c) Poli 1 d)Poli 2 e) Metal

La siguiente figura (5.3) muestra el modelo tridimensional del microespejo que fue mandado a construir a los laboratorios MEMSCAP.

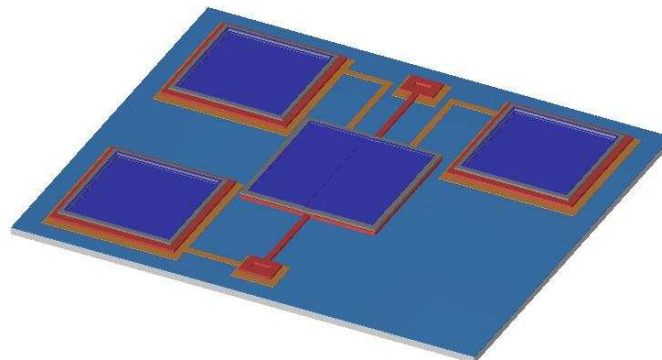


Figura 5.3 Modelo del microespejo torsional listo para construir

En la figura 5.4 se muestra el dado de 1 cm x 1 cm que fue mandado a construir. En él hay microespejos de pistón, torsionales, deformables y vigas. Del lado derecho se puede apreciar un banco de microespejos torsionales como el que se propuso en este trabajo, sin embargo para efectos de caracterización, el microespejo torsional propuesto es el que se muestra con el círculo blanco.

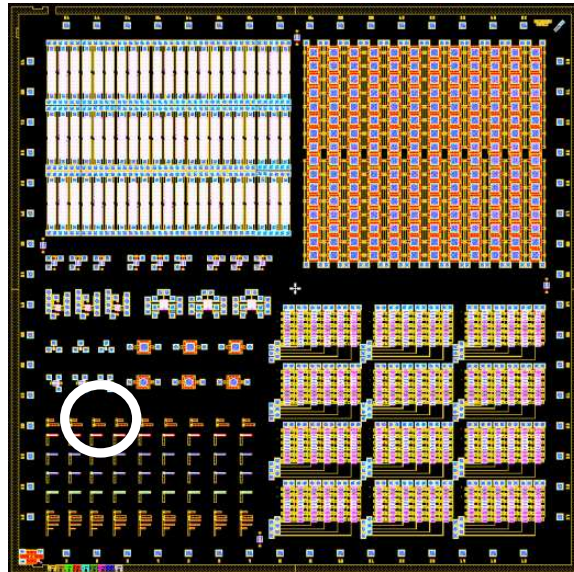


Figura 5.4 Dado construido por proceso PolyMUMPS

Finalmente, la imagen ampliada del microespejo torsional físico es la que se muestra a continuación (ver figura 5.5), en ella se pueden apreciar los cojincillos de conexión para los electrodos y para el microespejo, las vigas torsionales y los anclajes de las vigas.

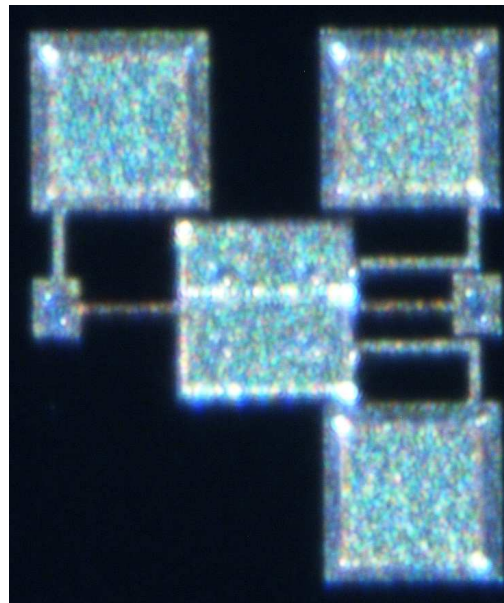


Figura 5.5 El microespejo torsional propuesto ya construido.

Aparentemente, en esta imagen, la superficie del microespejo toca uno de los cojincillos de conexión, sin embargo esto se debe a un reflejo de la luz sobre la superficie del microespejo, sin que ello llegue a afectar de modo alguno el comportamiento del mismo.

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, este trabajo no abarca la parte de caracterización del microespejo físico, únicamente su diseño y simulación

