

Diseño de un giróscopo capacitivo

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es el diseño y modelado de un giróscopo capacitivo construido como un microsistema. Se desea disponer de un flujo de proceso que permita su fabricación usando técnicas estándar, así como de las características de funcionamiento del dispositivo.

2. Descripción del giróscopo capacitivo

El funcionamiento del giróscopo capacitivo se fundamenta en una masa suspendida mediante un soporte elástico a un marco fijo, y que se somete a un desplazamiento en un eje. Si a la vez se produce una rotación en torno a un segundo eje, se producirá un desplazamiento en el tercero debido a la fuerza de Coriolis resultante. Midiendo este desplazamiento es posible determinar la velocidad de rotación a la que está sometido. Esta medida puede hacerse directa o indirectamente. En este trabajo vamos a realizar una medida directa del desplazamiento.

Si se tiene una partícula que se mueve en el plano $x - y$, y el sistema de referencia está girando alrededor del eje z con velocidad angular Ω (ver Fig. 1), la velocidad de la partícula en un sistema inercial \mathbf{v}_i está relacionada con la velocidad en el sistema rotativo \mathbf{v}_r por

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_r + \Omega \mathbf{k} \times \mathbf{r} \quad (1)$$

y la aceleración por

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_r + 2\Omega \times \mathbf{v}_r + \Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}) + \dot{\Omega} \times \mathbf{r} \quad (2)$$

siendo $\Omega = \Omega \mathbf{k}$ y \mathbf{r} el vector de posición de la partícula.

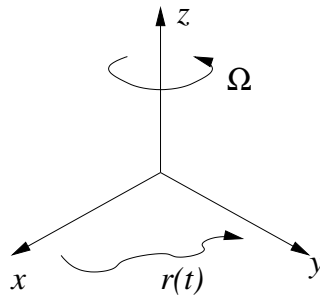


Figura 1: Partícula que se mueve en un sistema de referencia que gira

Se puede aplicar la segunda ley de Newton en el marco inercial, obteniéndose que la fuerza aparente en el marco rotativo se diferencia de la real por

$$m\mathbf{a}_r = \mathbf{F}_i - 2m\Omega \times \mathbf{v}_r - m\Omega \times (\Omega \times \mathbf{r}) - m\dot{\Omega} \times \mathbf{r} \quad (3)$$

siendo m la masa. En las direcciones x e y tenemos

$$m\ddot{x} = F_{i,x} + 2m\Omega\dot{y} + m\Omega^2x + m\dot{\Omega}y \quad (4)$$

$$m\ddot{y} = F_{i,y} - 2m\Omega\dot{x} + m\Omega^2y + m\dot{\Omega}x \quad (5)$$

Las fuerzas que se aprecian desde el marco rotativo pero no aparecen en el marco inercial se denominan fuerzas de Coriolis.

En el gir6scopo que se va a utilizar se tiene una masa m unida a un marco de referencia, y que se puede mover en las direcciones x e y (Fig. 2).

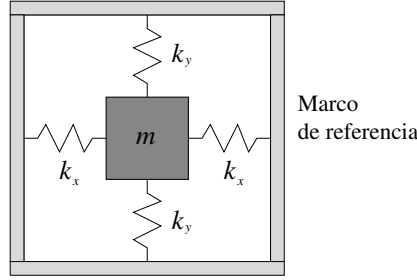


Figura 2: Modelo simplificado del gir6scopo

Se suponen peque1os desplazamientos y que los movimientos en x e y est1n desacoplados. Se definen las frecuencias de resonancia en cada eje como

$$\omega_x = \sqrt{\frac{2k_x}{m}} \quad (6)$$

$$\omega_y = \sqrt{\frac{2k_y}{m}} \quad (7)$$

Se forzar1 un movimiento en el eje x de frecuencia ω_d , cercana a ω_x para obtener grandes desplazamientos

$$x = x_0 \cos \omega_d t \quad (8)$$

con lo que la ecuaci3n en y queda

$$m\ddot{y} + b_y\dot{y} + m(\omega_y^2 - \Omega^2)y = -2m\Omega\dot{x} - m\dot{\Omega}x \quad (9)$$

Si se dise1a el sistema para que $\omega_y \gg \Omega$, el t6rmino Ω^2 se puede despreciar. Introducimos el factor de calidad $Q_y = m\omega_y/b_y$, y la ecuaci3n queda

$$\ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y}\dot{y} + \omega_y^2y = -2\Omega\dot{x} - \dot{\Omega}x \quad (10)$$

Para simplificar supondremos que Ω no var1a demasiado r1pido, con lo que la ecuaci3n se simplifica a

$$\ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y}\dot{y} + \omega_y^2y = 2\Omega\omega_dx_0 \sin \omega_d t \quad (11)$$

que es una ecuaci3n diferencial de segundo orden y se puede resolver.

Si la velocidad de rotaci3n es constante $\Omega = \Omega_0$, se puede demostrar que la amplitud del desplazamiento es

$$Y \simeq \frac{x_0\Omega_0}{\Delta\omega} \quad (12)$$

donde $\Delta\omega$ es la diferencia entre las frecuencias de resonancia en cada eje $\Delta\omega = |\omega_x - \omega_y|$.

El movimiento en el eje x será causado por la atracción electrostática debida a la diferencia de potencial entre electrodos conductores. El sensado del desplazamiento en y se llevará a cabo midiendo la diferencia de capacidad, por lo que será necesario colocar también electrodos. Los elementos elásticos en x e y corresponderán a vigas de sección cuadrada, como se ve en la Fig. 3.

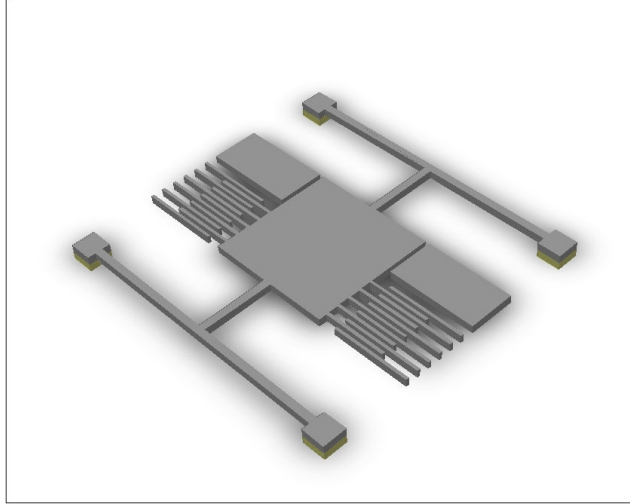


Figura 3: Estructura general del gir6scopo

Si se tienen dos conductores formando un condensador de placas paralelas, con una diferencia de potencial V entre ellos, la fuerza que aparece es

$$F = \frac{\epsilon AV^2}{2g^2} \quad (13)$$

donde A es el área enfrentada y g la separación entre placas. Si se tiene en cuenta que una de las placas es móvil y tiene una constante elástica k se tiene una ecuación que determina la separación en cualquier instante

$$g = g_0 - \frac{\epsilon AV^2}{2kg^2} \quad (14)$$

donde g_0 es la separación inicial.

Se puede demostrar que en el caso de una viga de sección rectangular con una fuerza aplicada en su centro, la constante elástica se puede calcular como

$$k = \frac{F}{x} = \left(\frac{\pi^4}{6} \right) \left(\frac{EWH^3}{L^3} \right) \quad (15)$$

siendo F la fuerza aplicada, y el desplazamiento del centro de la viga, E el módulo de Young del material, W la anchura de la viga, H su espesor en la dirección de la deformación, y L la longitud total de la viga.

Para el mismo caso de viga, la tensión mecánica máxima viene dada por

$$\sigma_{\max} = \frac{3FL}{4WH^2} \quad (16)$$

La posición de la masa se obtiene midiendo la variación de la capacidad entre ella y un electrodo fijo. La configuración que se va a usar es la de capacidad diferencial, en la que existen dos electrodos fijos y uno móvil. La capacidad entre los dos electrodos fijos es siempre constante, mientras que la capacidad existente entre el electrodo móvil y cualquiera de los fijos varía con la posición, como se puede ver en la figura 4.

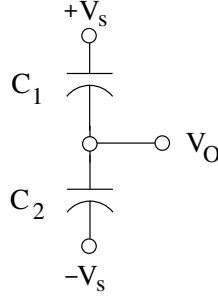


Figura 4: Tensiones en un condensador diferencial

Supongamos que la separación entre placas de C_1 es G_1 y la de C_2 es G_2 , y que se aplica una tensión $+V_s$ al electrodo superior de la figura y $-V_s$ al inferior. Entonces la tensión a la salida V_o es

$$V_o = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2}(2V_s) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}V_s \quad (17)$$

Si las áreas de los condensadores son iguales, la ecuación anterior queda

$$V_o = \frac{G_2 - G_1}{G_1 + G_2}V_s \quad (18)$$

de lo que se deduce que si ambas separaciones son iguales, entonces la tensión de salida es nula. También se aprecia que V_o varía linealmente con la diferencia de separaciones.

Tengamos ahora un condensador formado por dos electrodos móviles que han sido micromecanizados en una capa depositada sobre un sustrato. Los electrodos se mueven paralelamente al plano del sustrato (ver Fig. 5).

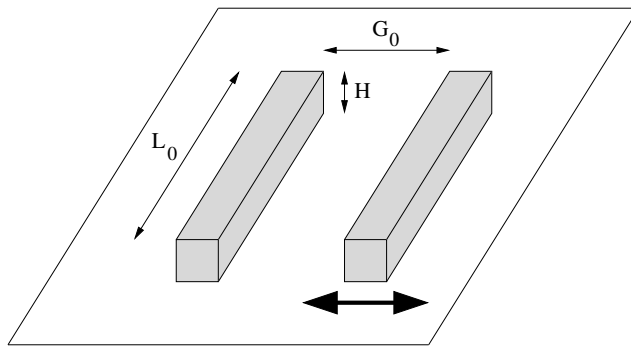


Figura 5: Condensador móvil micromecanizado

En el caso de que se pueda suponer que el condensador está formado por placas planas, la fórmula que da la capacidad es

$$C = \frac{\epsilon_0 H L_0}{G_0 \pm y} \quad (19)$$

donde H es el espesor de la capa de material, L_0 es la longitud enfrentada de los electrodos, G_0 es la separación entre electrodos en reposo, e y es la variación de esa separación. Vamos a suponer despreciable el efecto de bordes para calcular la capacidad, aunque en la mayoría de microsistemas este efecto es considerable.

3. Especificaciones y documentación a entregar

El sensor tendrá una estructura como la mostrada en la Fig. 3. En esa figura se muestra la masa suspendida, los soportes que la sostienen, y los electrodos de actuación y de medida.

El sensor no podrá ocupar un área mayor de $700 \times 700 \mu\text{m} \times \mu\text{m}$. La tensión de alimentación será ± 20 V. Se necesita en el dado un área para la electrónica asociada de $200 \times 100 \mu\text{m}$, y debe dejarse un borde en los cuatro lados del dado de $300 \mu\text{m}$ de anchura para la situación de los pads.

Se dispondrá internamente en el chip de una señal senoidal de 80V de amplitud y 10kHz .

Las especificaciones de diseño del sensor tratan de las siguientes magnitudes:

Sensibilidad Razón entre la salida y la entrada al sensor.

$$S = \frac{V_o}{\Omega} \quad (20)$$

Rango Máxima velocidad angular que se puede medir. Viene limitada normalmente por el margen de movimiento de la masa.

Ancho de banda Está limitado por la condición enunciada anteriormente de que la velocidad angular a medir debe variar lentamente $\Omega \ll \omega_y$. También debe cumplirse que $\omega_d \ll \omega_x$

Las especificaciones que deberá cumplir el dispositivo se obtendrán de la siguiente tabla. El dígito del DNI se obtiene sumando la última cifra de los números de DNI de los integrantes del grupo, y reduciendo el resultado a un único dígito. Por ejemplo, si las últimas cifras son 8, 7 y 2, la suma es $8+7+2=17$, $1+7=8$. El dígito es 8.

Dígito	Rango (1e6 rad/s)	Sensibilidad ($\mu\text{V}/(\text{rad/s})$)	Ancho de banda (kHz)
0	1	1	10
1	2	1	7.5
2	3	1	10
3	1	0.5	10
4	2	0.5	20
5	3	0.5	30
6	1	1	7.5
7	1	1	5
8	2	0.5	10
9	3	0.25	30

La documentación a entregar incluirá necesariamente:

- Breve memoria describiendo el proceso de diseño.
- Flujo de proceso de fabricación, conforme al ejemplo entregado en el Anexo D.
- Dibujos de todas las máscaras que se usan en el proceso, con indicación de sus dimensiones características.
- Presupuesto para la fabricación de 1, 1.000 y 1.000.000 unidades del dispositivo. Todos los costes de uso de equipos se abonan por horas completas.
- Hoja de características del dispositivo, incluyendo al menos: dimensiones, sensibilidad, rango, frecuencia de resonancia, y ancho de banda.

4. Información adicional

La página web de la asignatura es <http://www.gte.us.es/ASIGN/SEA>. El profesor encargado es Antonio Luque Estepa (aluque@gte.esi.us.es). Puede ser consultado en el despacho E2-SO-S17 en horario de tutoría: martes de 12 a 14h, y miércoles de 12 a 14h y de 17 a 19h.

Referencias

- [1] Stephen D. Senturia, *Microsystem design*, Kluwer Academic, 2001.
- [2] Marc J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 1997.
- [3] Nadim Maluf, *An introduction to microelectromechanical systems engineering*, Artech House, 2000.
- [4] J. W. Gardner, *Microsensors: principles and applications*, John Wiley & Sons, 1994.
- [5] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi, "Micromachined inertial sensors," *Proc. IEEE*, vol. 86, pp. 1640–1659, 1998.
- [6] Raymod J. Roark, Richard G. Budynas, and Warren C. Young, *Roark's Formulas for stress and strain*, McGraw-Hill, 2001.

Anexo A. Procesos y materiales disponibles

A.1. Sustratos

Material	Orientación	Diámetro (mm)	Espesor (μm)	Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Coste ud. (€)
Si, dopado p ó n, SSP	<100>	100	380	0.1-0.5	10
Si, dopado p ó n, DSP	<100>	100	380	0.1-0.5	18
Si, dopado p ó n, SSP	<100>	100	525	0.1-0.5	23
Si, dopado p, SSP	<100>	100	380	10-100	7
Si, dopado p, DSP	<100>	100	380	10-100	11
Si, dopado p, SSP	<100>	100	525	10-100	13
Si, dopado p, SSP	<100>	150	675	0.1-0.5	40
Si, dopado p, SSP	<100>	150	675	10-100	30
Pyrex 7740, DSP	amorfo	100	525	6.1	60

Nota: SSP Single Side Polished, DSP Double Side Polished.

A.2. Deposiciones

Material	Equipo	Velocidad ($\mu\text{m}/\text{min}$)	Espesor máximo (μm)	Obleas a la vez	Coste (€/h)
LPCVD óxido (LTO)	LPCVD	0.009	5	5	120
Óxido térmico	LPCVD	0.00565	10	10	100
LPCVD SiN	LPCVD	0.01	0.5	5	125
Evaporación metal	Evaporador efecto Joule	0.005	2	1	175
LPCVD Poly	LPCVD	0.03	2	5	100
Dopado poly	LPCVD	0.014	2	5	160
PECVD PSG/BPSG	PECVD	0.05	10	10	140

A.3. Grabados secos y húmedos y otros procesos disponibles

Proceso	Coste
Grabado húmedo	
Limpieza RCA	60 €
Baño HF 49 %	90 €/h
Baño KOH 49 % 80°C (anisotrópico)	80 €/h
Baño HNA 25°C (isotrópico)	80 €/h
Baño Al etch	85 €/h
Baño BHF	55 €
Grabado seco	
RIE SF ₆ (muy anisotrópico)	120 €/h
Otros procesos	
Photoresist stripper	60 €
Spin coater	50 €
Alineación / exposición UV	80 €
Developer track	20 €

A.4. Máscaras de fotolitografía

Máscaras	Coste ud. (€)
Cuarzo y cromo 4"	900
Cuarzo y cromo 6"	1500

Anexo B. Propiedades de los materiales

Propiedad	Unidad	Si	Poly	SiO ₂	LTO	SiN	BPSG	Al
Densidad (ρ)	kg/m ³	2330	2330	2197.7	2197.7	3184	2230	2700
Mód. de Young (E)	GPa	165	169	70	70	270	-	70
Resistividad	$\Omega \cdot m$	n/a	n/a	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{20}$	$8 \cdot 10^6$	$2,82 \cdot 10^{-8}$
Tensión de rotura	MPa	3400	1200	-	-	2000	-	176

Los materiales basados en óxidos (SiO₂, LTO, BPSG) tienen una tensión de rotura muy baja, y no deben usarse como materiales estructurales. En cambio, son buenos aislantes eléctricos. El SiN también es un excelente aislante eléctrico.

En cambio, el polisilicio (si se dopa) es un buen conductor eléctrico, con una resistividad de $5,5 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m$, que no es tan buena como la del aluminio, pero es aceptable.

Anexo C. Tasas de grabado de diferentes materiales y atacantes

Tasas en Å/min	Si	Poly	SiO ₂	LTO	SiN	BPSG	Al	Fotorresina
HF (49 %)	0	0	23000	14000	140	36000	42	0 (P ¹)
BHF 5:1	0	9	1000	1200	9	6800	1400	0
KOH (49 %), 80°C	14000	10000	77	94	0	380	10000	12000
HNA (126:60:5)	1500	3100	87	110	2	4000	4000	0
Al etchant (H ₃ PO ₄)	0	8	0	0	0	9	6800	0
RIE SF ₆	1100	1700	1100	1100	2800	1400	0	3100

Anexo D. Ejemplo de flujo de proceso

El siguiente flujo de proceso describe la fabricación de una viga suspendida por los dos extremos, fabricada en aluminio sobre un sustrato de silicio.

No.	Descripción	Equipo	Parámetros	Observaciones
1	Pasos previos			
1.1	Adquisición del sustrato	-	Si < 100 >, SSP, 380 μm , 0.1-0.5 $\Omega \cdot cm$	
1.2	Limpieza de las obleas	RCA bench		Para mejorar la adhesión en las deposiciones

¹La fotorresina se levanta después de algunos minutos

No.	Descripción	Equipo	Parámetros	Observaciones
2	Deposiciones de materiales			
2.1	Deposición SiN	LPCVD	0.2 μm , 20 min	
2.2	Deposición BPSG	PECVD	2 μm , 40 min	
3	Fotolitografía "Anclas"			
3.1	Fabricación máscara	Laser writer	Negativa	Máscara "Anclas"
3.2	Deposición de fotorresina	Spin coater	S1818 1.8 μm	Resina positiva
3.3	Exposición de la oblea	Insoladora	18 s	Máscara "Anclas"
3.4	Revelado	Developer track		
4	Grabado PSG			
4.1	Grabado BPSG	Wet bench	BHF, 3 min	
4.2	Eliminación fotorresina	Wet bench	Stripper, 1 min	
5	Deposición aluminio			
5.1	Deposición Al	Evaporador efecto Joule	0.5 μm , 100 min	
6	Fotolitografía "Viga"			
6.1	Fabricación máscara	Laser writer	Positiva	Máscara "Viga"
6.2	Deposición fotorresina	Spin coater	S1818 1.8 μm	Resina positiva
6.3	Alineación oblea y máscara	Alineadora		
6.4	Exposición de la oblea	Insoladora	18 s	Máscara "Viga"
6.5	Revelado	Developer track		
7	Grabado aluminio			
7.1	Grabado Al	Wet bench	Al etch, 45 s	
7.2	Eliminación fotorresina	Wet bench	Stripper, 1 min	
8	Liberación de la estructura			
8.1	Eliminación BPSG	Wet bench	BHF, 15 min	Peligro de rotura en el secado
9	Pruebas y medidas			

Las dos máscaras que se mencionan en el proceso se pueden ver en la figura 6:

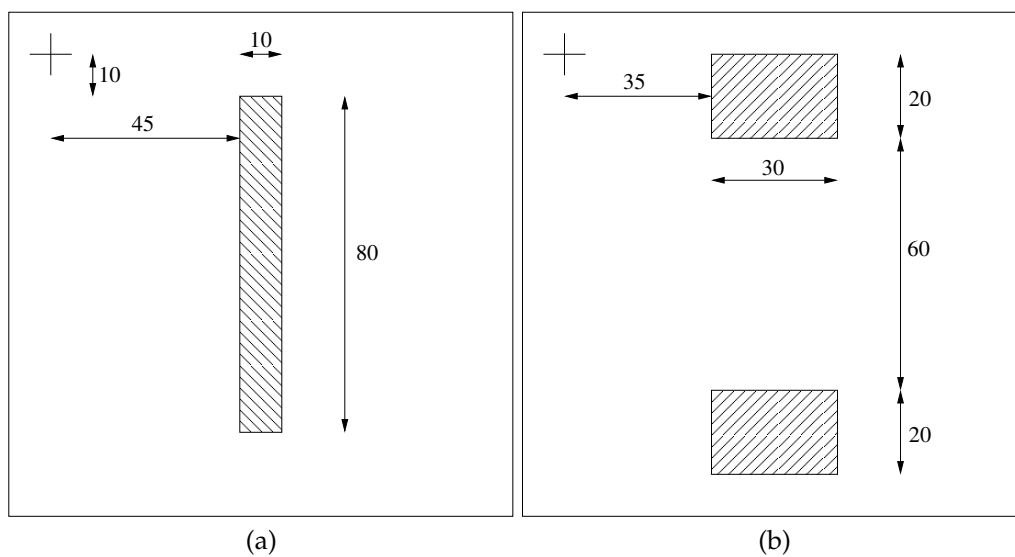


Figura 6: (a) Máscara "Viga". (b) Máscara "Anclas". Todas las unidades en μm