



Diseño de un acelerómetro en PolyMUMPS

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es el diseño y modelado de un acelerómetro capacitivo unidireccional construido como un microsistema. El diseño se realizará para ser fabricado usando el proceso PolyMUMPS, estándar en microsistemas. Se deberá disponer de las máscaras necesarias para la fabricación, así como de las características de funcionamiento del dispositivo.

2. Descripción del acelerómetro capacitivo

El funcionamiento del acelerómetro capacitivo se fundamenta en una masa suspendida mediante un soporte elástico a un marco fijo, y sometida a los efectos de la aceleración que se desea medir. Midiendo los desplazamientos de esta masa, es posible determinar la aceleración a que está sometida. Esta medida puede hacerse directa o indirectamente. En este trabajo vamos a realizar una medida directa del desplazamiento.

Una sistema dinámico compuesto por una masa m suspendida mediante un soporte elástico de constante elástica k tiene una frecuencia de resonancia no amortiguada ω_0 dada por

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

y un factor de calidad en la resonancia $Q = m\omega_0/b$, siendo b la constante de amortiguación de la oscilación. Esta amortiguación se origina fundamentalmente por el rozamiento de la masa con el aire que la rodea al moverse.

Puesto que para conocer la aceleración nos interesa un movimiento cuasi-estático, en el que el desplazamiento de la masa sigue a la fuerza (o aceleración) exterior prácticamente sin retraso, se debe asegurar en el diseño del sensor que la frecuencia máxima esperada para la aceleración a medir sea mucho menor que la frecuencia natural del sistema ω_0 .

Ya que el desplazamiento cuasi-estático de la masa viene dado por (ley de Hook)

$$y = \frac{F}{k} \quad (2)$$

y que la fuerza F es igual a la masa m por la aceleración a que se desea medir (2º principio de Newton), se puede deducir que la proporcionalidad entre el desplazamiento y la aceleración es

$$y = \frac{a}{\omega_0^2} \quad (3)$$

Se deduce de esta relación que si se diseña un acelerómetro capaz de responder rápidamente a variaciones de aceleración (ω_0 grande), entonces la amplitud de la señal de salida (x) es pequeña, y viceversa.

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 1.

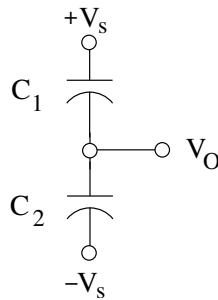


Figura 1: Tensiones en un condensador diferencial

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

$$V_o = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2}(2V_s) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}V_s \quad (4)$$

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

$$V_o = \frac{G_2 - G_1}{G_1 + G_2}V_s \quad (5)$$

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. 2).

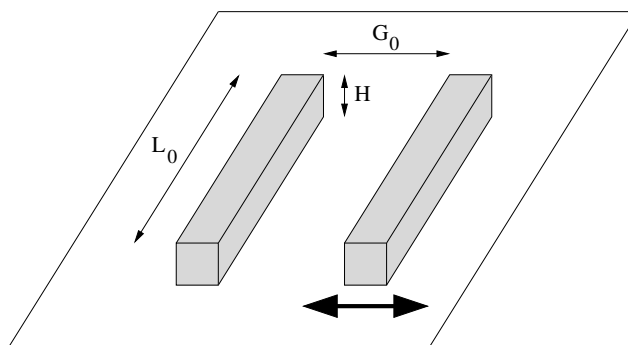


Figura 2: Condensador móvil micromecanizado

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

$$C = \frac{\epsilon_0 H L_0}{G_0 \pm y} \quad (6)$$

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.

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

$$k = \frac{F}{y} = \left(\frac{\pi^4}{6} \right) \left(\frac{EWH^3}{L^3} \right) \quad (7)$$

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

$$\sigma_{\max} = \frac{3FL}{4WH^2} \quad (8)$$

3. Especificaciones y documentación a entregar

El sensor tendrá una estructura en peine de electrodos, como la mostrada en la Fig. 3. En esa figura se muestra la masa suspendida y los soportes que la sostienen, y que están anclados al sustrato.

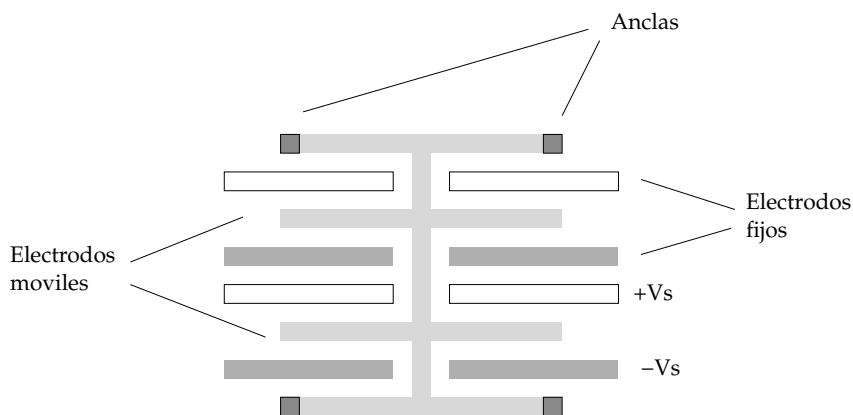


Figura 3: Vista en planta de la estructura básica del acelerómetro.

Un run de PolyMUMPS proporciona un área de $950 \times 950 \mu\text{m} \times \mu\text{m}$, que se puede subdividir en dados más pequeños con un coste. En cada dado o subdado se necesitarán conexiones eléctricas (pads) que ocuparán un lado con una anchura de $300 \mu\text{m}$. La tensión de alimentación será $\pm 20 \text{ V}$.

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

Sensibilidad Razón entre la salida y la entrada al sensor.

$$S = \frac{V_o}{a} \quad (9)$$

Rango Máxima aceleración que se puede medir. Viene limitada normalmente por el margen de movimiento de los electrodos.

Ancho de banda Está limitado por la condición enunciada anteriormente de que la frecuencia máxima esperada para la aceleración debe ser mucho menor que ω_0 . Esta condición la expresaremos matemáticamente como

$$10f_{max} \leq \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (10)$$

siendo f_{max} el ancho de banda.

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	Sensibilidad (mV/(m/s ²))	Ancho de banda (Hz)
0	1.8	150
1	2.0	200
2	1.2	150
3	2.5	100
4	1.2	200
5	1.8	100
6	1.8	150
7	2.5	100
8	1.2	200
9	1.8	100

En todos los casos deberá verificarse que el rango de aceleraciones a medir es al menos de 250 m/s^2 . Las tensiones mecánicas en todos los puntos de la estructura deben ser menores que la tensión de rotura del material que se esté usando.

La aceleración equivalente provocada por el ruido de la disipación viscosa es de $0.5 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$.

La documentación a entregar incluirá necesariamente:

- Breve memoria describiendo el proceso de diseño.
- Dibujos de todas las máscaras que se usan en el proceso, con indicación de sus dimensiones características.
- Comprobación del cumplimiento de las reglas de diseño.
- Hoja de características del dispositivo, incluyendo al menos: dimensiones, sensibilidad, rango, frecuencia de resonancia y ancho de banda.
- Diagrama de Bode con la respuesta del acelerómetro.

4. Reglas de diseño

El proceso PolyMUMPS posee una serie de reglas de diseño destinadas a asegurar la correcta fabricación de los dispositivos, y que deberán ser respetadas por el diseño del acelerómetro.

En todas las máscaras se considerará una característica mínima de 3.0 μm y un espaciado mínimo de 2.0 μm . Para evitar problemas en la pixelación de la máscara se recomienda usar figuras ortogonales, o pixeladas a 2.0 μm .

Regla	Descripción	Dimensión mín.
A	POLY0 space to ANCHOR1	4.0
B	POLY0 enclose ANCHOR1	4.0
C	POLY0 enclose POLY1	4.0
D	POLY0 enclose POLY2	5.0
E	POLY0 enclose ANCHOR2	5.0
F	POLY0 space to ANCHOR2	5.0
G	POLY1 enclose ANCHOR1	4.0
N	POLY1 enclose DIMPLE	4.0
H	POLY1 enclose POLY1_POLY2_VIA	4.0
O	POLY1 enclose POLY2	4.0
K	POLY1 space to ANCHOR2	3.0
R	*Lateral etch holes space in POLY1	≤ 30 (max)
J	POLY2 enclose ANCHOR2	5.0
L	POLY2 enclose POLY1_POLY2_VIA	4.0
P	POLY2 cut-in POLY1	5.0
Q	POLY2 cut-out POLY1	4.0
M	POLY2 enclose METAL	3.0
I	POLY2 space to POLY1	3.0
T	HOLE2 enclose HOLE1	2.0
U	HOLEM enclose HOLE2	2.0
S	*Lateral etch holes space in POLY2	≤ 30 (max)

5. 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.
- [7] Allen Cowen, Busbee Hardy, Ramaswamy Mahadevan, and Steve Wilcenski, *Poly-MUMPS Design Handbook, revision 13*, MEMSCAP, Inc., 2011.

Anexo A. Espesores de las capas de PolyMUMPS

Capa	Espesor (μm)	Máscara
Nitride	0.6	-
Poly 0	0.5	POLY0 (HOLE0)
Óxido 1	2.0	DIMPLE, ANCHOR1
Poly 1	2.0	POLY1 (HOLE1)
Óxido 2	0.75	POLY1_POLY2_VIA, ANCHOR2
Poly 2	1.5	POLY2 (HOLE2)
Metal	0.5	METAL (HOLEM)

Anexo B. Máscaras y polaridad

Máscara	Fondo	Función
POLY0	Claro	Forma del plano de tierra
ANCHOR1	Oscuro	Orificios para conexión de Poly1 con Poly0 o Nitride
DIMPLE	Oscuro	Dimples en Poly1
POLY1	Claro	Forma de Poly1
POLY1_POLY2_VIA	Oscuro	Orificios para conexión de Poly2 con Poly1
ANCHOR2	Oscuro	Orificios para conexión de Poly2 con Poly0 o Nitride
POLY2	Claro	Forma de Poly2
METAL	Claro	Forma de Metal
HOLE0	Oscuro	Orificios en Poly0
HOLE1	Oscuro	Orificios en Poly1
HOLE2	Oscuro	Orificios en Poly2
HOLEM	Oscuro	Orificios en Metal

Anexo C. Propiedades de los materiales

Propiedad	Unidad	Si	Poly	Oxide	Nitride	Metal
Densidad (ρ)	kg/m^3	2330	2330	2197.7	3184	19280
Mód. de Young (E)	GPa	165	169	70	270	80
Resistividad	$\Omega \cdot \text{m}$	n/a	$2,38 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{20}$	$2,91 \cdot 10^{-6}$
Tensión de rotura	MPa	3400	1200	-	2000	100

Los óxidos tienen una tensión de rotura muy baja, y no deben usarse como materiales estructurales. En cambio, son buenos aislantes eléctricos. El Nitride también es un excelente

aislante eléctrico.

Anexo D. Resumen de reglas de diseño

Capa 1	Capa 2	Enclose	Spacing	Cut-in	Cut-out
POLY0	ANCHOR1 POLY1 ANCHOR2 POLY2	4 (B) 4 (C) 5 (E) 5 (F)	4 (A) 5 (F)		
POLY1	POLY0 ANCHOR1 ANCHOR2 POLY2 DIMPLE POLY1_POLY2_VIA	4 (G) 4 (O) 4 (N) 4 (H)	3 (K)		
POLY2	POLY0 POLY1 VIA ANCHOR2 METAL	4 (L) 5 (J) 3 (M)	3 (I)	5 (P)	4 (Q)