

Porosidad en transductores piezoeléctricos de película gruesa

Gwirc, S.⁽ⁱ⁾; Negreira C.⁽ⁱⁱ⁾

⁽ⁱ⁾INTI- Electrónica e Informática

⁽ⁱⁱ⁾Instituto de Física, Facultad de Ciencias – LAU - Uruguay

Resumen

Se presenta el cálculo de las constantes elásticas y eléctricas de una cerámica piezoeléctrica porosa realizada utilizando la tecnología de película gruesa y la simulación, utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF), del comportamiento vibratorio de un disco de PZT poroso sobre un sustrato de alúmina. Para hallar las constantes utilizamos el modelo de cubos modificado de H. Banno en el que suponemos poros cerrados con simetría esférica y distribución homogénea en la película. El valor de la constante dieléctrica relativa, inferior a la del PZT tradicional, es fundamental para determinar la impedancia eléctrica que presentará el transductor a la frecuencia de resonancia. Este valor se ve afectado por el alto grado de porosidad de la cerámica y por el vidrio fritado utilizado para pegar las partículas de PZT. El valor típico de porosidad representa una disminución de la densidad del 20% aproximadamente, respecto de una cerámica no porosa y esto conduce a que la velocidad de las ondas longitudinales en el PZT se reduzca en un 35%. Al mismo tiempo, su menor densidad es causante de la disminución de la impedancia acústica del compuesto cerámico. El cálculo de las constantes muestra que la porosidad es la responsable principal de las diferentes características de este tipo de película.

1. Introducción

En trabajos anteriores se ha presentado el funcionamiento y algunas características de los transductores piezoeléctricos de ultrasonido, fabricados mediante serigrafía con tecnología de película gruesa [1][2]. Su alta eficiencia en aplicaciones de ensayos no destructivos e imágenes para diagnóstico médico está basada en la tecnología de fabricación y en ciertas diferencias de la película con respecto a una cerámica fabricada mediante alta presión y temperatura, con el mismo material base. La bibliografía presenta varios dispositivos fabricados con esta tecnología pero es poca la información sobre las características básicas del PZT depositado por serigrafía y su funcionamiento, así como las consideraciones a tener en cuenta en su aplicación y las razones por las que difieren sus propiedades.

Aún cuando se utilice un programa de simulación en el diseño de transductores de vibración, ultrasonido y otros componentes como los MEMs para aplicaciones industriales se requiere el conocimiento detallado de muchas características del material PZT como las constantes piezoeléctricas, mecánicas y acústicas, o la combinación de varias, al desarrollar un determinado dispositivo.

Presentamos en este trabajo un método de cálculo de las constantes elásticas y eléctricas de una cerámica piezoeléctrica de película gruesa, a partir de los datos del material de base y considerando la porosidad, típica de esta película, como principal causa de las modificaciones en sus propiedades electromecánicas. Se comparan estos resultados con los valores experimentales.

2. Procedimiento Experimental

Las mediciones, para comparación los cálculos, se realizaron sobre muestras fabricadas con una pintura que tiene como base un polvo cerámico comercial fabricado por Ferroperm Ltd., identificado como PZ27. Las características de esta pintura, una vez sinterizada sobre alúmina, fueron medidas directamente o calculadas a partir de un modelo electromecánico utilizando la curva de impedancia. Estos datos se detallan en la Tabla I, comparándolos con los valores de la hoja de datos del fabricante. Una dificultad importante al utilizar la Tabla I como base para el diseño, radica en que la mayoría de los parámetros son dependientes del hecho que la película está adherida al sustrato y de la geometría. Es decir, no representan al material libre y no pueden usarse directamente en una simulación con elementos finitos, por ejemplo.

Tabla I. Características Comparativas.

Propiedad	Unidades	PZ27	PZ27+PG
Densidad	(10 ³) kg/m ³	7,7	6,2
Cte. Dieléctrica K_{33}^T	ϵ/ϵ_0	1800	350 – 450
Cte. de Carga d_{33}	(10 ⁻¹²) C/N	425	106
Acoplamiento EM k_t	-	0,47	0,31
Veloc. Sonido V_L	m/s	3900	2650
tang δ	-	0.017	0.06
Impedancia Acústica	Mryals	-30	-16
Q_M	-	80	30 – 40

Al analizar esta estructura con poros y su influencia en las propiedades mecánicas y piezoeléctricas de la película de PZT, tomamos como referencia el modelo de cubos modificado propuesto por H. Banno[3][4], aplicado a cerámicas piezoeléctricas con poros cerrados. En este modelo consideramos a la película como un compuesto piezoeléctrico formado por cubos superpuestos y se incluye una constante L_s que representa el apartamiento de la simetría esférica de los poros y su distribución en la matriz cerámica. Como suponemos los poros esféricos o que su forma está orientada aleatoriamente en las tres direcciones, y su distribución es homogénea en la película piezoeléctrica de modo que $L_s=1$. Se asume también que el material, desde el punto de vista elástico, es isotrópico y que tanto el módulo de Young (E) como el cociente de Poisson (ν) de los poros son cero. La fracción en volumen de poros P se estima a partir de la densidad medida de la película.

La constante dieléctrica de la cerámica porosa se puede calcular a partir del valor de la cerámica no porosa como:

$$\overline{K}_{33}^T = K_{33}^T \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P}{L_s} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{P^{\frac{2}{3}}}{\left[P^{\frac{1}{3}} \cdot (K_{33}^T - 1) \cdot L_s^{\frac{2}{3}} + 1 \right] \cdot L_s^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (1)$$

El cociente de Poisson (ν) viene dado por:

$$\overline{\nu} = \nu \cdot \left(1 - P^{2/3} \cdot L_s^{1/3} \right) \quad (2)$$

De la misma manera las constantes elásticas verifican las siguientes relaciones:

$$\overline{S}_{11} = S_{11} \cdot \left[1 - P^{2/3} \cdot L_s^{1/3} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\overline{S}_{33} = S_{33} \cdot \left[1 - \left(\frac{P}{L_s} \right)^{2/3} \right]^{-1} \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores, las constantes con la barra superior representan las correspondientes al material poroso. De manera similar se pueden hallar las constantes piezoeléctricas de carga y calcular también la constante de acoplamiento electromecánico, la que nos da una idea de la eficiencia del transductor para convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa. Los valores encontrados para esos parámetros se ven en la Tabla II.

Tabla II. Datos comparativos de los parámetros elásticos y piezoeléctricos en cerámicas porosas y no porosas.

	PZ27	TF-PZ27
$S_{11} \cdot 10^{-12}$ (m ² /N)	17	25
$S_{33} \cdot 10^{-12}$ (m ² /N)	23	34
$d_{31} \cdot 10^{-12}$ (C/N)	-170	-134
$d_{33} \cdot 10^{-12}$ (C/N)	425	297
k_{33}	.59	.54
ν	.39	.26

3. Constante dieléctrica

El cálculo de la constante dieléctrica requiere un comentario particular. Teniendo en cuenta que la pintura contiene una pequeña cantidad de vidrio para mejorar la estabilidad mecánica de la misma, la constante dieléctrica relativa que se encuentra es $\overline{K}_{33}^T \cong 1000$. Este valor está alejado del que figura en la Tabla I, pero tenemos que hacer varias correcciones para obtener valores comparables. En primer lugar, este valor está muy influenciado por la distribución de poros en la película que no es del todo homogénea cuando se pintan capas superpuestas. Cuando se aplican sobre una superficie porosa, la capa anterior que absorbe parte del vehículo, dificulta la homogeneización durante el sacado. Si adjudicamos a L_s un

valor de 0,75 en lugar de la unidad que utilizamos hasta ahora, es suficiente para dar cuenta de esta diferencia.

En segunda instancia tenemos que tener en cuenta que la medición se realiza con la película adherida al sustrato y debemos corregirlo. Teniendo en cuenta ambos efectos, el valor de la constante dieléctrica para un disco delgado de PZT, impedido de moverse radialmente debido al sustrato de alúmina es el valor que figura en la Tabla I, y su relación con el valor calculado en (1) es la siguiente:

$$\overline{K}_{33}^S \cong (1 - \overline{k}_{33}^2) \cdot \overline{K}_{33}^T \approx 400 \quad (5)$$

El resto de las constantes piezoeléctricas y de acoplamiento se calculan de la manera usual^[5], y las más importantes se muestran en la Tabla II.

4. Simulación MEF

Con los parámetros hallados se encontró la respuesta vibratoria, utilizando una simulación con MEF, del desplazamiento de un disco de PZT al variar la frecuencia de vibración. Se comparó esta respuesta con la de un hidrófono que responde a la presión que genera el disco. La simulación reproduce bien las características de baja frecuencia, con un pequeño desplazamiento en los máximos. A alta frecuencia, las diferencias se deben principalmente a que se utilizó un modelo sencillo de disco PZT sobre un sustrato, y además se requiere un mejor ajuste en los parámetros.

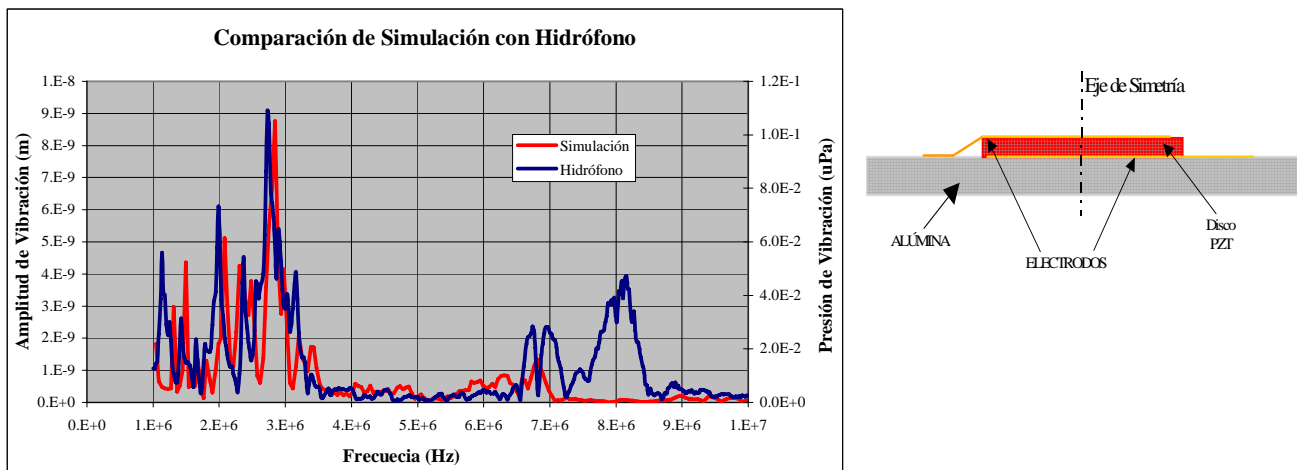


Fig. 2: Comparación entre la respuesta vibratoria medida con hidrófono (azul) y la amplitud simulada con ANSYS (rojo)

5. Conclusiones

Se ha demostrado que la porosidad de la película es la principal responsable de que tenga diferentes características que el PZT tradicional. El método de cálculo de las constantes de un cerámico de película gruesa a partir de su porosidad permite el diseño y la optimización de variados componentes que hasta ahora debía hacerse a través de sucesivos ensayos. El control de la porosidad permitirá variar las características de la película y utilizarla para seleccionar la más adecuada para un diseño determinado.

Referencias

- [1] S. N. Gwirc, S. Tropea, C. Negreira, N. Perez, F. Montero de Espinosa, "Fabrication and Characterization of Piezoelectric Thick Film Elements and Arrays", Proceedings of the "IEEE International Ultrasonics Symposium", Vol. 2, pp. 1121-1124, Oct. 2000.
- [2] S. N. Gwirc, M. F. García Morillo, N. Pérez, C. Negreira, "Thick Film PZT Arrays Vibration Modes", Proceedings of the "IEEE International Ultrasonics Symposium", Vol. 2, pp. 1189 -1191, Oct. 2002.
- [3] H. Banno, "Theoretical Equations for Dielectric and Piezoelectric Properties of Ferroelectric Composites Based on Modified Cubes Model", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 24, Supplement 24-2, pp. 445-447, 1985.
- [4] H. Banno, "Effects of shape and volume fraction of closed pores on dielectric, elastic, and electromechanical properties of dielectric and piezoelectric ceramics", Am. Ceram. Soc. Bull., vol.66, pp.1332-7, 1987.
- [5] G. S. Kino, "Acoustic Waves", Egewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1987.