

Materiales piezoeléctricos: formas de presentación, ventajas y desventajas en las aplicaciones

B. JIMÉNEZ

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid . Serrano , 144 , 28006 Madrid.

El enorme desarrollo que han experimentado las aplicaciones de los materiales piezoeléctricos en las nuevas tecnologías se ha debido, fundamentalmente, al descubrimiento de las propiedades ferroeléctricas en los materiales con estructura tipo perovskita de composiciones basadas en el Titanato de Plomo. La posibilidad de preparar soluciones sólidas en forma cerámica y más recientemente el polímero PVDF y los materiales compuestos por una fase activa piezoeléctrica y otra fase no activa, "composites", están contribuyendo a tal desarrollo.

El interés que han despertado los ferroeléctricos en forma de lámina delgada con vistas a su utilización como memorias no volátiles y en la detección de radiación infrarroja, depositadas en substratos semiconductores y con posibilidad de tener orientaciones preferentes, está impulsando a considerar esta forma como material piezoeléctrico para uso en microposicionadores y dispositivos SAW (ondas acústicas superficiales).

En este trabajo se hace un estudio comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada una de las formas de material antes citadas en las diferentes aplicaciones de los materiales piezoeléctricos.

Palabras clave: Piezoeléctricos, cerámicas, aplicaciones.

Piezoelectric Materials: forms, advantages and disadvantages of the applications

The piezoelectric materials acquired an impressive development in new technological applications since the incorporation of perovskite-like structure compositions based on lead titanate. The feasibility of preparing solid solutions in ceramic form, the design of piezoceramic-polymer composites and the discovery of the PVDF polymer as a piezoelectric material have strongly contributed to such a progress.

Ferroelectric thin films are also increasing their potential of technical applications in integrated devices as non volatile memories and infrared sensors. The possibility of using them as a piezoelectric material for micropositioners and SAW devices is being considered.

The aim of this paper is to give an overview on the advantages and disadvantages of the different forms of the piezoelectric materials in technological applications.

Key words: Piezoelectrics, Ceramics, Applications

1. INTRODUCCION

Las propiedades piezoeléctricas de los materiales se presentan en 20 de las 32 clases cristalinas existentes. De esas 20 clases, once poseen un eje polar definido y un solo sentido de la polarización: son los materiales piroeléctricos. Cuando la polarización puede tener dos sentidos en la misma dirección o más de un eje polar y se puede pasar de un sentido a otro mediante la aplicación de un campo eléctrico se tiene un material ferroeléctrico.

Existen otros materiales que no se pueden incluir en la clasificación anterior y que, sin embargo, presentan propiedades similares a aquellos. Son los polímeros ferroeléctricos con propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas.

Entre el monocristal y el polímero (amorfo) se encuentran los materiales policristalinos que se pueden preparar en forma de cerámica y de lámina delgada.

Como combinación entre materiales cerámicos y amorfos (polímeros, vidrios) resultan los materiales compuestos, conocidos como "composites".

Aunque nos centraremos principalmente en las aplicaciones derivadas de las propiedades piezoeléctricas, es interesante dar una semblanza sobre otras posibilidades de los ferroeléctricos (1) que han tenido y siguen teniendo una importancia grande en el desarrollo tecnológico debido a la utilización de nuevas composiciones y conformaciones de los materiales.

Las aplicaciones más usuales se basan en las siguientes propiedades:

1.1. Alta permitividad

En las aplicaciones electrónicas actuales se requiere disponer de altas capacidades eléctricas en dimensiones muy reducidas y con posibilidad de integración en el propio circuito electrónico. Los materiales ferroeléctricos con estructura tipo perovskita tienen altas permitividades en ciertas direcciones cristalográficas y si se preparan en forma policristalina se puede disponer de un dieléctrico de fácil conformación y alta permitividad.

Mediante un adecuado diseño de sustituciones catiónicas en composiciones basadas en titanatos y niobatos de plomo se han conseguido valores para la constante dieléctrica relativa del orden de 20.000.

La producción de condensadores cerámicos de pequeño tamaño es una de las más importantes después de la de los semiconductores.

1.2. Piroelectricidad

La generación de una corriente eléctrica mediante un cambio de temperatura en un material ferroeléctrico ha encontrado un campo de aplicación importante en la detección de radiación infrarroja y en la conversión de energía termo-eléctrica

El principio en que se basa la aplicación es la corriente eléctrica debida a variaciones térmicas de la polarización:

$$i = A (dP/dt) = A (dP/dT) (dT/dt) = A.p.(dT/dt)$$

donde A es el área de la muestra y "p" el coeficiente piroeléctrico.

La bondad de respuesta de un detector piroeléctrico o Figura de Mérito (2) se expresa por las relaciones:

$$\text{Respuesta en voltaje: } F_v = p (c' \epsilon \epsilon_0)^{-1/2}$$

$$\text{Detectividad: } F_D = p [c' (\epsilon \epsilon_0 \tan \delta)^{1/2}]^{-1}$$

c' es el calor específico y δ el ángulo de pérdidas dieléctricas.

La figura de mérito es, por tanto, directamente proporcional al coeficiente piroeléctrico, p, e inversamente proporcional a las pérdidas dieléctricas. En la Tabla I se muestran las características de diferentes materiales de posible uso como detectores de radiación infrarroja. Se incluyen monocristales, cerámicas y polímeros.

TABLA I: PARÁMETROS PIROELÉCTRICOS (2)

Material	p 10 ⁻⁴ Cm ⁻² K ⁻¹	Dielectric ε tanδ	c' 10 ⁶ Jm ⁻³ K ⁻¹	Fv m ² C ⁻¹	F _D 10 ⁵ Pa ^{1/2}
TGS	5,5	55 0,025	2,6	0,43	6,1
DTGS	5,5	43 0,020	2,4	0,60	8,3
ATGS.As	7,0	32 0,010		0,99	17,0
SBN-50	5,5	400 0,003	2,3	0,07	7,2
PVDF	0,27	12 0,015	2,43	0,10	0,88
Cer. PT	3,8	290 0,011	2,5	0,06	3,3
LiTaO ₃	2,3	47 0,005	3,2	0,17	4,9

Se observa que los monocristales de TGS (Sulfato de Tri-Glicina) y sus derivados son los que dan mayor respuesta F_v. Son preferidos para detectores de un solo elemento y para blancos de los vidicones. Tienen el inconveniente de ser solubles en agua y tener una baja estabilidad química y térmica. También es prometedor el SBN-50 (Niobato de Estroncio y Bario 50/50): su alta constante dieléctrica le hace interesante para dispositivos multielementos en imágenes térmicas, sin embargo, son difíciles de obtener como buenos monocristales.

Los polímeros tienen un coeficiente piroeléctrico y constante dieléctrica bajos con pérdidas altas. Su figura de mérito es baja, sin embargo, su baja conductividad térmica es favorable para uso en vidicones. Al poder disponer de superficies grandes y espesores

muy pequeños, les hace atractivos para algunos detectores de bajo precio. Son poco adecuados para hacer dispositivos multielementos por su baja permitividad.

Las cerámicas ofrecen un buen número de ventajas sobre los anteriores:

- Son relativamente fáciles de obtener en superficies grandes y no muy costosos.
- Son química y mecánicamente robustos.
- Tienen temperaturas de Curie altas.
- No sufren el impacto del ruido térmico
- Se pueden modificar sus propiedades actuando sobre la composición de modo que se pueden controlar los coeficientes p, ε, tan δ y σ (conductividad).
- Se puede controlar el tamaño de grano para modificar las propiedades mecánicas

Son muy apropiados para detectores de área pequeña como los que se usan en dispositivos multielementos para imágenes térmicas. En el mercado se encuentran como monoelementos para alarmas de intrusos y como multielementos para imágenes térmicas.

Láminas delgadas: Por técnicas Sol-Gel las láminas de Tántalo-Escandio-Plomo, PST, depositadas sobre un sustrato se han conseguido valores de constante dieléctrica de pico de 9000, un coeficiente piroeléctrico de 35.10⁻⁴ Cm⁻²K⁻¹ y valores de pico de la figura de mérito de hasta 11.10⁻⁵ Pa^{-1/2}, que es del orden de los mostrados en la Tabla I. La deposición directa en el sustrato lleva a la eliminación de consumo de tiempo en desbastados y pulidos. Es posible también integrarlo directamente en el circuito electrónico amplificador.

1.3. Termistores

Los materiales ferroeléctricos cerámicos en ciertas condiciones presentan un enorme salto en el valor de la resistividad en la temperatura de transición. Esta característica es importante para la aplicación de los ferroeléctricos como sistemas de protección de circuitos eléctricos de sistemas de caldeo, de motores de arranque, de extinción gradual de iluminaciones eléctricas, etc. Entre los materiales más adecuados para estos dispositivos se encuentra el Titanato de Bario dopado con ciertos cationes: Fe³⁺, Ce²⁺ y otros.

1.4. Electroópticos

En los ferroeléctricos transparentes a la radiación visible los índices de refracción cambian cuando se les aplica un campo eléctrico. Se produce un cambio importante en la birrefringencia óptica, Δn, que, dependiendo de su relación con el campo eléctrico, es de la forma:

$$\text{Efecto Pockels: } \Delta n = r.E$$

$$\text{Efecto Kerr: } \Delta n = g.E^2$$

a partir de estas relaciones es fácil deducir posibles aplicaciones. Actualmente se incorporan como:

Moduladores ópticos. Puertas ópticas y otros dispositivos.

Efecto fotorrefractivo: Se puede modificar el índice de refracción localmente iluminando el ferroeléctrico transparente con un haz de luz de longitud de onda adecuada. La radiación luminosa produce un daño en el material generando una carga de espacio que bajo la influencia de la polarización espontánea crea un campo eléctrico que actúa sobre esa zona del material modificando el índice de refracción por causa del efecto electrooptico. Estas "grabaciones" permanecen durante muchísimo tiempo (años) y se puede utilizar como forma de almacenaje de información (memorias ópticas) y formadores de imágenes holográficas.

1.5. Piezoelectricidad

Partiendo de las expresiones de la energía libre de Gibbs se obtienen las siguientes relaciones:

Desplazamiento eléctrico: $D = d \cdot T + \epsilon E$ (efecto directo)

Deformación elástica: $S = s \cdot T + d \cdot E$ (efecto inverso)

donde: d es el coeficiente piezoeléctrico de carga; s , la complianza elástica T , la tensión mecánica; ϵ , la permitividad dieléctrica y E , el campo eléctrico .

Existe una relación entre la deformación que sufre un sólido por la acción de un campo eléctrico independientemente de la piezoelectricidad, es el efecto electrostrictivo que se da en todos los sólidos, pero que en cierto tipo de materiales ferroeléctricos es un efecto muy amplificado (relaxores).

Deformación: $x = q \cdot E^2$

donde q , es el coeficiente de electrostricción.

Para la caracterización de un piezoeléctrico se utiliza normalmente el efecto piezoeléctrico inverso: se aplica un campo eléctrico sinusoidal de frecuencia variable y se mide la respuesta a través de la impedancia eléctrica y del ángulo de desfase .

Midiendo las frecuencias de mínima y máxima impedancia que se pueden asimilar a las frecuencias de resonancia y antirresonancia electromecánica y a través de expresiones matemáticas conocidas se deducen los parámetros piezoeléctricos.

Si se desea una medida precisa, como suele ser el caso en los piezoeléctricos de altas pérdidas, es necesario utilizar métodos más elaborados. Así, se ha desarrollado en nuestro laboratorio un método iterativo que permite resolver la ecuación correspondiente a la Impedancia electromecánica en forma compleja:

$$Z = R + iX = -i t (2\pi f S \epsilon_0 \epsilon_{33}^S)^{-1} + i h_{33}^2 (2\pi^2 S f^2 c_{33}^D \sqrt{\rho / c_{33}^D})^{-1} + \tan(\pi t \rho / c_{33}^D)$$

con t = espesor, h_{33} = coeficiente piezoeléctrico, S = área

Las incógnitas son: h_{33} , ϵ_{33} y c_{33}^D . Utilizando el factor de acoplamiento electromecánico

$$k_t^2 = \epsilon_0 \epsilon_{33} S h_{33}^2 / c_{33}^D$$

y como estimación inicial el coeficiente elástico

$$c_{33}^D = 4\rho t^2 f_p^2 [1 + i(\Delta f_p / f_p)]$$

tomando las frecuencias para el máximo y el mínimo de X alrededor de f_p se sigue un proceso de aproximaciones hasta conseguir el mejor ajuste con las curvas experimentales (ver trabajos 3, 4).

El coeficiente de acoplamiento electromecánico tiene un claro sentido físico al definirlo como la relación entre la energía convertida almacenada y la energía suministrada almacenada y da una primera y clara idea de la bondad del transductor,

$$k^2 = E_{ME}^2 / (E_{MM} \cdot E_{EE})^{-1}$$

E_{ME} = Energía mecanoeléctrica convertida

E_{MM} = Energía mecánica suministrada

E_{EE} = Energía eléctrica suministrada

2. MATERIALES CERAMICOS PIEZOELECTRICOS

Desde el descubrimiento de la ferroelectricidad en el Titanato de Bario y de sus importantes propiedades piezoeléctricas, y sobre todo con la aparición de las soluciones sólidas de Titanato Circonato de Plomo con enormes coeficientes piezoeléctricos y electromecánicos, las aplicaciones tecnológicas se han desarrollado de forma espectacular (a principio de los 80, solamente en USA se facturaban más de 200 millones de dólares). Prácticamente todos los dispositivos de conversión de energía electromecánica tienen como transductores las cerámicas piezoeléctricas, quedando los piezoeléctricos clásicos como el cuarzo para aplicaciones

concretas y muy relacionadas con patrones de tiempo, filtros de banda muy estrecha, etc.

Las causas fundamentales de dicho desarrollo se pueden centrar en los siguientes aspectos (ya se indicaron algunos en las aplicaciones piroléctricas):

- Facilidad de preparación en forma de soluciones sólidas

- Posibilidad de tener formas geométricas diferentes

- Buenas propiedades mecánicas

- Altos coeficientes piezoeléctricos y de acoplamiento electromecánico ($k = .70$)

- Buena estabilidad química y térmica

- Buenas propiedades dieléctricas: alta ϵ' y baja ϵ''

En la Tabla II se muestran las características comerciales más usuales. Se incluyen algunos valores correspondientes al cuarzo.

TABLA II: CARACTERÍSTICAS COMERCIALES

Datos Térmicos	Unidades	Cer.PXE5	Cuarzo
Temper. Curie	°C	285,0	
Calor Específ.	J/kg °C	420,0	
Cond. Térmic.	W/m °C	1,2	
Datos mecánicos			
Densidad	10 ³ kg/m ³	7,6	
	s ³³	18,9	0,97
Compli. elástic.	s ¹¹ 10 ⁻¹² m/N	15,4	1,26
	s ⁵⁵	38,5	2,80
Coef. Poisson	σ	0,3	0,13
Factor Q (mec.)		80,0	20.10 ⁶
Fuerz. Compre.	10 ⁶ N/m ²	> 600,0	
Datos Elec.Mecá.			
Factor Acopio	k _p	0,6	0,1
	k ₃₃	0,7	
Coef.piezo.	d ₃₁ 10 ⁻¹² C/N	384,0	0,5
Datos eléc.			
Const. Diel.	ϵ'	1800,0	
Pérdidas	Tan δ	0,006	
Resistividad	ρ , 10 ¹² Ω .m	1,0	

Se puede comprobar la gran diferencia que existe en los valores de los distintos parámetros para ambos materiales. Exceptuando el factor de calidad mecánico, Q_M , las ventajas de las cerámicas son evidentes.

3. POLIMEROS

Los orígenes de la ferroelectricidad y su investigación en los polímeros se remonta a los años 20, cuando los científicos descubrieron que ciertos materiales orgánicos podían ser enfriados en presencia de un campo eléctrico y conseguir de esta forma sólidos con propiedades piroléctricas y piezoeléctricas. Pero fue a partir del descubrimiento en 1969 (5) de una fuerte actividad piezoeléctrica (mucho mayor que la de los materiales orgánicos) en el polímero Fluoruro de Polivinilideno, PVDF, cuando se empezó de forma intensa y sistemática la investigación en polímeros ferroeléctricos. Esta publicación despertó un gran interés en la utilización de los polímeros en dispositivos como micrófonos, hidrófonos y detectores de radiación electromagnética.

Actualmente el conocimiento de la piezo y piroelectricidad en PVDF parece haber alcanzado un alto grado de madurez en términos de desarrollo teórico, de técnicas experimentales para conseguir altos niveles de polarización y también de estabilidad, entendimiento de la estructura y morfología y su relación con las propiedades eléctricas. Sin embargo, parece que la aplicación de estos conocimientos a los dispositivos «high tech.» no está a la altura de la investigación ni del conocimiento científico en el campo. Una razón puede ser la falta de producción de estos materiales. No obstante, hay muchas ventajas en los polímeros que aún no se han utilizado. El sentir de los expertos es que tarde o temprano los polímeros piezoeléctricos serán utilizados en numerosas aplicaciones.

Una primera aproximación a la piezoelectricidad en PVDF fue realizada por Broadhurst et al. (6) sobre la base de un modelo de composite en el que la fase I (cristalito) es una fina lamela con una superficie normal a la superficie del film que posee una polarización espontánea debido a la orientación dipolar del cristal. Tashiro et al. (7) trataron el cálculo numérico de constantes piezoeléctricas del PVDF según la teoría del composite de Y. Wada y R. Hayakawa (8), en el que partículas esféricas con polarización espontánea están embebidas en una matriz isotropa.

4. COMPOSITES PIEZOELECTRICOS

Combinando una cerámica piezoeléctrica y un polímero (o un vidrio) pasivo para formar un composite permite diseñar nuevos piezoeléctricos que ofrecen ventajas sustanciales sobre las cerámicas piezoeléctricas convencionales y polímeros piezoeléctricos (9-10).

En los composites se define el concepto de «conectividad» que es la continuidad de cada una de las dos fases del composite con el medio exterior. Si la conexión se produce en una, dos o las tres direcciones del espacio tendremos las continuidades 1, 2 y 3 respectivamente. Así, la denominación (0-3) significa que una de las fases, normalmente la activa, no tiene conexión con el exterior -0- y la otra está conectada tridimensionalmente -3-.

Los composites de más fácil realización son los de conectividades (0-3), (partículas piezoeléctricas embebidas en una matriz pasiva, y (1-3) con la fase activa conectada únicamente en la dirección del espesor de la muestra. Son los que más aplicaciones tecnológicas están teniendo actualmente.

La importancia de estos materiales es que se puede jugar con la distribución geométrica de las fases y adaptar las características del material a las necesidades del dispositivo correspondiente, mejorando en muchas de ellas a las de las fases componentes.

5. APLICACIONES DE LOS MATERIALES PIEZOELECTRICOS

En principio todos los materiales descritos aquí se pueden aplicar en los diferentes dispositivos basados en la conversión de energía mecanoeléctrica. La utilización de uno u otro material dependerá de los requerimientos energéticos y de la precisión y sensibilidad de los dispositivos. En la Tabla III se indican las aplicaciones más clásicas de los transductores piezoeléctricos, así como el material más adecuado para cada aplicación.

En el caso de los hidrófonos, la figura de mérito, $M = d_{11} \cdot g_{11}$, en los polímeros y en los composites es mucho mayor que en las cerámicas:

Composite (1-3), $M = 5900$. Cerámica PZT, $M = 180$. PVDF, $M = 1200$

TABLA III: APLICACIONES MÁS USUALES DE LOS FERROELÉCTRICOS CERÁMICOS

Dispositivo	Modo	Cerámica	PVDF	Composite
Acelerómetros	No Res.	x		
Ignitores	"	x		
Hidrófonos	"	x	x	x
Micrófonos	"	x	x	x
Actuadores	"	x		
Motores	"	x		
Auriculares	"	x		
Zumbadores	"	x		
Altavoces	"	x	x	
Ventiladores	"		x	
Genera. Sonar	"/Reso.	x		
Limpiadores	Reso.	x		
Emulsionadores	Reso.	x		
SAW	No Reson.	x		
Filtros	Reson.	x		
Líneas retardo	"	x		
Osciladores	"	x		
Transformadores	"	x		

Parece, por tanto, que la cerámica es la menos adecuada para esta aplicación, sin embargo requerimientos de robustez y estabilidad química la mantienen en primer lugar.

Las aplicaciones de los transductores electromecánicos se puede clasificar en dos grupos importantes, dependiendo de la intensidad de las ondas acústicas generadas o transformadas. En las aplicaciones de alta intensidad acústica se emplean valores desde décimas de W por cm^2 a varios kW por cm^2 y a frecuencias ultrasónica por debajo de los 100 kHz (11). Este campo de aplicación se conoce como «macrosónica». Por debajo de la menor de las intensidades citadas se encuentran la mayor parte de las aplicaciones de la tabla anterior. Actualmente, la mayoría de los transductores sónicos de potencia están basados en el clásico transductor tipo «sandwich». El diseño y el cálculo son fundamentales para ampliar el área de trabajo, la eficiencia y la potencia. Los materiales utilizados dentro de los piezoeléctricos son las cerámicas. Es necesario establecer un compromiso entre las pérdidas mecánicas y eléctricas (Q , $\tan\delta$) para conseguir los mejores resultados. (Aplicaciones típicas de estos transductores son: limpieza, mecanización, soldadura, atomización, aglomeración, etc.).

En el campo de la baja potencia y alta precisión (posicionadores, micromotores etc.), las cerámicas tienen poca competencia actualmente.

6. APLICACIONES EN DISPOSITIVOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y EN MEDICINA

En las aplicaciones que hemos señalado anteriormente, las cerámicas piezoeléctricas son los materiales que presentan las mejores características para conseguir las mejores prestaciones, aparte de que en muchas de ellas es impensable utilizar los polímeros o composites por sus altas pérdidas mecánicas y dificultad de polarización en espesores por encima de los cien micrones, caso de los polímeros.

Sin embargo, una de las aplicaciones que se han desarrollado

enormemente en los últimos quince años ha sido la ecografía ultrasónica para uso en medicina y en dispositivos de ensayos no destructivos.

Ha sido concretamente en estas aplicaciones donde se ha establecido una gran competencia entre los tres tipos de materiales piezoeléctricos: Cerámicos, Polímeros y Composites.

Las condiciones que debe reunir un dispositivo de ecografía ultrasónica son las siguientes:

- 1.- Coeficiente de acoplo electromecánico en espesor, k_p , alto.
- 2.- Buen acoplo acústico con el medio: impedancias acústicas parecidas.
- 3.- Bajas pérdidas mecánicas : $Q_M > 10$
- 4.- Bajas pérdidas eléctricas : $\tan \delta < 10\%$
- 5.- Facilidad de acoplo al circuito eléctrico: constante dieléctrica > 100 .
- 6.- Bajo coeficiente de acoplo planar, k_p , para evitar mezclas de sobretonos con el modo espesor.
- 7.- Posibilidad de tener conformaciones geométricas con facilidad.
- 8.- Estabilidad química y térmica buenas.

En la Tabla IV se hace una exposición de las condiciones que cada uno de los materiales cumple con mayor o menor éxito.

TABLA IV: CONDICIONES QUE CUMPLEN LOS DISTINTOS MATERIALES

Condición	Cerámica	PVDF	Composite
1	+	-	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	+	-	+
5	+	-	+
6	+ (PTC)	+	+
7	-	+	+
8	+	-	-

El signo - significa bajo cumplimiento de la condición correspondiente.

Las frecuencias de trabajo de estos dispositivos se encuentra actualmente entre 1 MHz y 25 MHz.

A la vista de esta tabla parece bastante claro que los composites son los más adecuados para estas aplicaciones.

La mayoría de los dispositivos comerciales utilizan las cerámicas por el simple hecho de ser las más conocidas y disponer de unos sistemas de caracterización muy estandarizados y de una producción muy amplia que permite seleccionar las más apropiadas para cada caso. No obstante, los transductores requieren complicadas estructuras que pueden ser eliminadas con el empleo de los composites. Actualmente ya se dispone de sensores de composites para usos médicos. También es posible el desarrollo de nuevos polímeros que cumplan alguna más de las condiciones arriba indicadas. Se está dedicando un gran esfuerzo para introducir los polímeros de forma importante en el campo de la ecografía ultrasónica.

7. LAMINAS DELGADAS

Se han obtenido señales piezoeléctricas en láminas delgadas de Titanato de Plomo (PT) preparadas sobre diminutas barritas (12).

Las barritas de Si-SiO₂ de 10² - 10³ micrones se obtuvieron por ataque químico preferencial. La aplicación de la señal ultrasónica produce vibraciones en la barrita induciéndose una tensión mecánica de cizalladura en la lámina delgada de PT. Se ha obtenido una constante piezoeléctrica, $d_{31} = -4,3 \times 10^{-12}$ C/N, que es prácticamente igual a la de la cerámica, $-4,4 \times 10^{-12}$ C/N.

Ondas acústicas superficiales han sido aplicadas a una lámina delgada de PLT (28% de La) epitaxiada sobre un monocristal de zafiro (001) y se colocaron 80 pares de electrodos interdigitales. La constante de acoplo electromecánico, k^2 , del modo principal es del orden del 0,85%.

Es necesario mayor desarrollo de las técnicas de preparación de las láminas para aumentar su espesor y homogeneidad con el fin de poder disponer de direcciones de polarización apropiadas.

8. CONCLUSIONES

Actualmente son los piezoeléctricos cerámicos los que presentan mayores cotas de aplicación. Se puede decir que dominan ampliamente en todos los dispositivos comerciales.

En algunas aplicaciones los polímeros (PVDF) están introduciéndose con bastante fuerza: Hidrófonos, micrófonos y dispositivos de grandes superficies.

En la ecografía ultrasónica los composites presentan las mejores perspectivas.

Las láminas delgadas son excelentes candidatos para microdispositivos ultrasónicos en circuitería integrada. ♦

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado a través de los Proyectos de investigación: CICYT -Mat91- 0422 y CE - BREU - CT91 - 0504 (RZJE)

BIBLIOGRAFIA

1. J. Burfoot and G.W. Taylor.- «Polar dielectric and their Applications». The Macmillan Press Ltd. London (1979).
2. R. Watmore.- «Piezoelectric ceramics and devices for thermal infra-red detection and imaging». *Ferroelectrics*, **118**, 241, (1991).
3. C. Alemany, L. Pardo, B. Jiménez, F. Carmona, J. Mendiola and A. González.- «Automatic iterative evaluation of complex material constants in piezoelectric ceramics». *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27**, 148, (1994).
4. C. Alemany, A. M. González, L. Pardo, B. Jiménez, F. Carmona and J. Mendiola.- «Automatic determination of complex constants of piezoelectric lossy materials in the radial mode». *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28**, 945, (1995).
5. H. Kawai.- «The piezoelectricity of poly(vinylidene Fluoride)». *Jap. J. Appl. Phys.*, **8**, 975, (1969).
6. M. G. Broadhurst, G. T. Davis, J. E. McKinney and R. E. Collins.- «Piezoelectricity and pyroelectricity in polyvinylidene fluoride- A model». *J. Appl. Phys.*, **49**, 4992, (1978).
7. K. Tashiro, M. Kobayashi, H. Tadokoro and E. Fukada.- «Calculation of elastic and piezoelectric constants of polymer crystals by a point charge model: Application to Poly(vinylidene fluoride) form I». *Macromolecules*, **13**, 691, (1980).
8. Y. Wada and R. Hayakawa.- «A model theory of piezo and pyroelectricity of poly(vinylidene Fluoride)». *Ferroelectrics*, **32**, 115, (1981).
9. W. Smith y A. A. Shaulov.- «Composite piezoelectrics: Basic research to a practical device». *Ferroelectrics*, **87**, 309, (1988).
10. W. Smith.- «The role of piezocomposites in ultrasonic transducers». *Procc. Ultrasonics Symposium*, page 755, (1989).
11. J. A. Gallego.- «Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers». *J. Phys. E: Sci. Instruments*, **22**, 804, (1989).
12. M. Okuyama y Y. Hamakawa.- «PbTiO₃ ferroelectric thin films and their pyroelectric application». *Ferroelectrics*, **118**, 261, (1991).