

Actuadores piezoeléctricos

Miguel Cúpich Rodríguez*
Fernando J. Elizondo Garza*

I. INTRODUCCIÓN

La palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega: $\pi\epsilon\zeta\omega$ que significa estrechar, apretar u oprimir. En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste; ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Mas tarde ellos verificaron que un campo eléctrico aplicado al cristal proporcionaba una deformación al material. Este efecto era referido como “efecto piezo inverso”. Los materiales piezoeléctricos, por lo tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.



Después de su descubrimiento pasaron varias décadas antes de que se utilizara el fenómeno piezoeléctrico. La primera aplicación comercial fué en detectores ultrasónicos para submarinos desarrollados durante la 1ª Guerra Mundial y en la década de los cuarenta los científicos descubrieron que el titanato de bario (cerámico) puede comportarse como material piezoeléctrico en presencia de un campo eléctrico.

Actualmente el efecto piezoeléctrico es a menudo encontrado en la vida diaria. Por ejemplo, en encendedores de gas para cigarrillos o encendedores para parrillas en estufas de gas; una palanca aplica presión a un cristal piezoeléctrico

creando un campo eléctrico lo bastante fuerte para producir una chispa que encienda el gas.

Además, relojes con alarma utilizan a menudo elementos piezoeléctricos. Cuando un voltaje de C.A. es aplicado, el material piezoeléctrico se mueve a la frecuencia de dicho voltaje y el sonido resultante es bastante alto para despertar al más reacio dormilón.

En el campo de la ingeniería el uso más común del fenómeno piezoeléctrico, actualmente, es en los actuadores piezoeléctricos. Un actuador piezoeléctrico es un dispositivo que produce movimiento (desplazamiento) aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad. Los actuadores que utilizan este efecto están disponibles desde hace aproximadamente 20 años y han cambiado el mundo del posicionamiento de precisión. El movimiento preciso que resulta cuando un campo eléctrico es aplicado al material, es de gran valor para nanoposicionamiento.



* Academia de Dinámica Aplicada del Departamento de Diseño Mecánico de la FIME
mcupich@gama.fime.uanl.mx; fjeliz@ccr.dsi.uanl.mx

II. LOS MATERIALES PIEZOELECTRICOS

Propiedades

Ya que el efecto piezoeléctrico exhibido por materiales naturales tales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, etc., es muy pequeño, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, por ejemplo los materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos, como el BaTiO₃ y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT).

Los cerámicos PZT, disponibles en muchas variaciones, son los materiales más ampliamente usados hoy para aplicaciones como actuadores o sensores. La estructura cristalina del PZT es cúbica centrada en las caras (isotrópico) antes de la polarización y después de la polarización exhiben simetría tetragonal (estructura anisotrópica) por abajo de la temperatura de Curie, que es aquella en la cual la estructura cristalina cambia de forma piezoeléctrica (no-simétrica) a no-piezoeléctrica. A esta temperatura los cerámicos PZT pierden las propiedades piezoeléctricas.

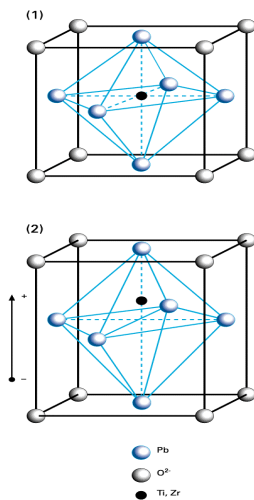


Fig. 1. Celda elemental piezoeléctrica; (1) Antes de polarizarse (2) Después de polarizarse.

La razón del comportamiento de dipolo eléctrico es la separación entre los iones de carga positivo y negativo. Una región de dipolos eléctricos con orientación similar es llamada dominio. A los grupos de dipolos con orientación paralela se les llama dominio de Weiss. El dominio de Weiss está orientado aleatoriamente en el grueso del material del PZT, antes de que el tratamiento de polarización sea efectuado. Para este propósito se aplica un campo eléctrico ($> 2000 \text{ V/mm}$) al piezo cerámico (calentado). Con el campo aplicado, el material se expande a lo largo del eje del campo y se contrae perpendicularmente a este eje. Los dipolos eléctricos se alinean y permanecen rígidamente alineados hasta su enfriamiento. El material tiene ahora una polarización permanente (la cual puede ser degradada si se exceden los límites mecánicos, térmicos y eléctricos del material). Como resultado, hay una distorsión que causa un aumento en las dimensiones alineadas con el campo y una contracción en los ejes normales al campo.

Cuando un voltaje es aplicado a un material piezoeléctrico polarizado, el dominio de Weiss aumenta su alineamiento proporcionalmente al voltaje. El resultado es un cambio en las dimensiones (expansión, contracción) del PZT.

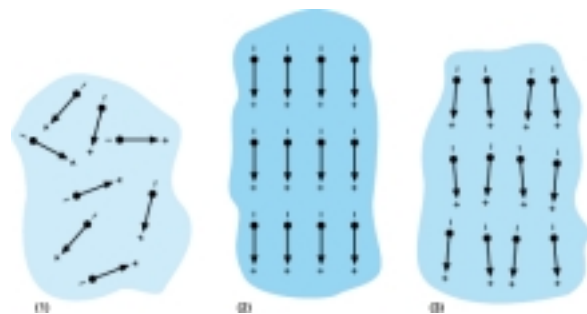


Fig. 2. Dipolos eléctricos en el dominio de Weiss (1) cerámico ferroeléctrico sin polarizar (2) durante y (3) después de la polarización (cerámico piezoeléctrico).

Desplazamiento de Piezo Actuadores (Tipo pila y tipo contracción)

El desplazamiento de los cerámicos PZT es función de la intensidad del campo eléctrico aplicado E, del material utilizado y de la longitud L del cerámico PZT. Las propiedades materiales pueden ser descritas por los coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria d_{ij} . Estos coeficientes describen la relación entre el campo eléctrico aplicado y la deformación mecánica producida. El desplazamiento D_L de un piezo actuador de una sola capa, sin carga, puede ser estimado por medio de la ecuación:

$$D_L = \pm E * d_{ij} * L_o$$

Donde:

- L_o = longitud del cerámico [m]
- E = intensidad del campo eléctrico [V/m]
- d_{ij} = coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria

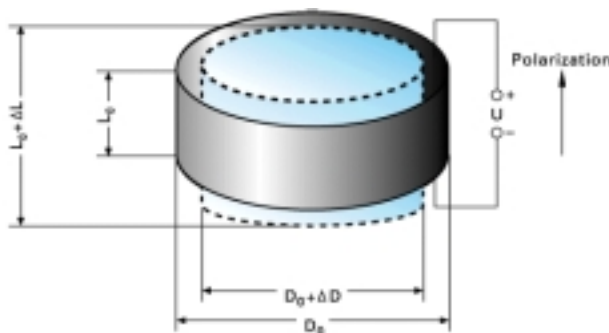


Fig. 3. Elongación y contracción de un disco de PZT cuando se le aplica un voltaje.

Hystéresis (PZTs de lazo abierto)

Los piezo actuadores de lazo abierto exhiben hystéresis. La hystéresis se fundamenta en los efectos de polarización cristalina y en la fricción molecular. El desplazamiento absoluto generado

por un PZT de lazo abierto depende del campo eléctrico aplicado y de la piezo ganancia la cual es relativa a la polarización permanente. La hystéresis es típicamente del orden de 10 a 15 % del movimiento comandado.

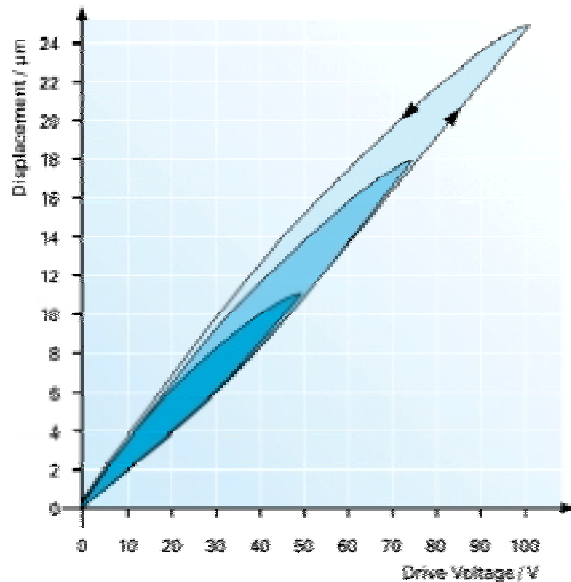


Fig. 4. Curvas de hystéresis de un piezo actuador de lazo abierto para varios voltajes de pico.

III.- VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO PIEZOELECTRICOS

Resolución

Un actuador piezoeléctrico puede producir cambios de posición extremadamente finos por abajo del rango de subnanómetro. Los pequeños cambios en el voltaje de operación son convertidos en suaves movimientos.

Generación de grandes fuerzas

Un actuador piezoeléctrico puede generar una fuerza de varios miles de Newtons. Existen

unidades comerciales que pueden sostener cargas de varias toneladas y posicionarlas dentro del rango de más de 100 μm con resolución subnanométrica.

Expansión rápida

Los piezo actuadores ofrecen el tiempo más rápido de respuesta disponible (microsegundos). Se pueden obtener aceleraciones de más de 10,000 g's.

Ningún efecto magnético

El efecto piezoelectrico está relacionado a los campos eléctricos. Los actuadores piezo eléctricos no producen campos magnéticos ni son afectados por éstos. Son especialmente apropiados para aplicaciones donde los campos magnéticos no pueden tolerarse.

Baja potencia de consumo

El efecto piezo convierte directamente energía eléctrica en movimiento absorbiendo energía sólo durante éste. La operación estática, aún sosteniendo cargas pesadas, no consume potencia.

Libre de desgaste y roturas

Un actuador piezo no tiene engranes ni ejes rotativos. Su desplazamiento se basa en la dinámica de estado sólido y no muestra desgaste ni rotura. Se han efectuado pruebas de resistencia en las cuales no se han observado cambios después de varios miles de millones de ciclos.

Compatible con cuartos limpios y Vacío

Los piezo actuadores son elementos que no necesitan ningún lubricante y no muestran desgaste y abrasión. Esto los hace compatibles con cuartos limpios e idealmente apropiado para aplicaciones de Ultra Alto Vacío.

Operación a Temperaturas Criogénicas

El efecto piezo se basa en campos eléctricos y funciona hasta casi cero grados Kelvin (con especificaciones reducidas).

IV.- APLICACIONES DE LOS PIEZO ACTUADORES

En Óptica, Fotónica y Tecnología de Medición:

Estabilización de imagen, microscopía electrónica, sistemas de auto enfoque, interferometría, alineación y conexión de fibra óptica, scanners de espejo rápido, óptica activa y adaptable, sintonización de láser, posicionadores de espejos, holografía y estimulación de vibraciones.

En Unidades de disco:

Para prueba de cabezas y cancelación de vibración.

En Microelectrónica

En nano-metrología, posicionamiento de obleas y máscaras, medición de dimensiones críticas, microlitografía, sistemas de inspección y cancelación de vibración.

En Mecánica de Precisión e Ingeniería Mecánica

Cancelación de vibración, deformación estructural, ajuste de herramienta, corrección de desgaste, micro bombas, actuadores lineales, piezo martillos, sistemas de micro grabado y generación de ondas de choque.

En Medicina, Biología y Ciencias de la Vida

Tecnología de genes, micro manipulación, penetración de células, dispositivos microdispensadores, estimulación audiofisiológica y generación de ondas de choque.

V. TIPOS DE ACTUADORES PIEZOELECTRICOS

Actuador tipo pila

La configuración más común en un piezo actuador es el tipo "pila" de varias capas de cerámico con dos salidas eléctricas. Para proteger el cerámico contra influencias externas, este se ubica dentro de una carcasa de metal. A esta carcasa se le pueden incorporar resortes para comprimir el cerámico de tal forma que permita la operación de tensión y compresión. La figura 5 muestra un esquema del diseño eléctrico de un piezo actuador tipo pila.

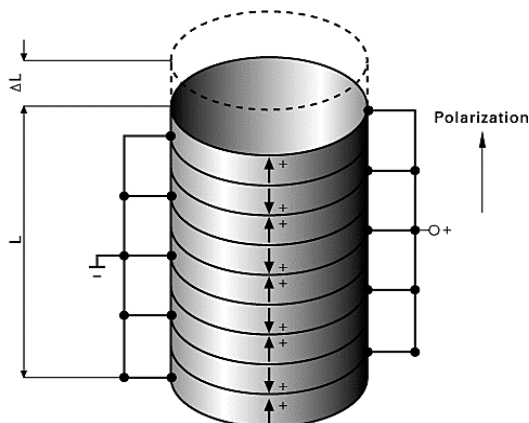


Fig. 5. Diseño de un actuador piezoeléctrico tipo pila.

La figura 6 muestra un ejemplo de un actuador de bajo voltaje con resortes internos pre-cargados y un sensor de alta resolución integrado. Este actuador provee desplazamiento hasta 90 micrones y rigidez hasta de 400 N/μm. Puede manejar cargas hasta de 300 kilogramos y resistir fuerzas de estiramiento hasta de 700 N. Las aplicaciones incluyen cancelación de vibración, generación de

ondas de choque y posicionamiento de herramientas en máquinas para la fabricación de superficies no esféricas de lentes de contacto.



Fig. 6. Actuador tipo pila.

En algunas aplicaciones, las restricciones de espacio no permiten pilas tan largas. En este caso, es posible usar los amplificadores mecánicos de palanca para disminuir la longitud de la pila cerámica. El aumento en el rango de recorrido ganado con un amplificador mecánico reduce la rigidez y la máxima frecuencia de operación del actuador.

Actuadores "flexure"

En algunas aplicaciones un solo actuador tipo pila no es suficiente para desempeñar tareas complejas. Por ejemplo, cuando un movimiento recto es necesario y solo puede ser tolerada una desviación nanométrica desde la trayectoria ideal, un actuador tipo pila no puede utilizarse porque puede inclinarse algo así como unos 10 arcossegundos mientras se está expandiendo. Si la pila y la parte a ser movida están desacopladas y se

emplea un sistema guía de precisión puede lograrse un excepcional control de la trayectoria. La mejor guía de precisión puede lograrse con el nanoposicionador “Flexure” el cual cuenta con un amplificador de movimiento integrado.



Fig. 7. Nanoposicionador tipo “Flexure” y scanner con amplificador de movimiento integrado.

Posicionadores “Flexure” de uno o varios ejes son utilizados en investigación, en laboratorios y aplicaciones industriales tales como verificación de unidades de disco, alineadores de pantallas para rayos X escalonados, óptica adaptativa, maquinado de precisión, alineadores de fibra, microscopía electrónica, sistemas de autoenfoco para perfil de superficies y servo válvulas hidráulicas.

Piezo actuadores combinados con sistema de posicionamiento motorizado de amplio rango

Los Piezo actuadores pueden combinarse con otros actuadores para formar un sistema de alta resolución de amplio rango. La figura 8 muestra un ejemplo que combina un piezo actuador con un tornillo motorizado. Esta combinación provee 25 mm de movimiento burdo pero conserva las características de alta de resolución intrínsecas a los piezoactuadores.



Fig. 8. Combinación de un piezo actuador y un tornillo motorizado.

V.- OPERACIÓN

Operación en lazo abierto y cerrado

Los actuadores piezoeléctricos pueden operar en lazo abierto y lazo cerrado. En lazo abierto, el desplazamiento corresponde aproximadamente al voltaje manejado. Este modo es ideal cuando no es crítica la precisión de la posición absoluta o cuando la posición es controlada por datos que provee un sensor externo. Los piezo actuadores de lazo abierto exhiben histéresis y comportamiento “creep”.

Los actuadores de lazo cerrado son ideales para aplicaciones que requieren alta linealidad, amplia estabilidad de posición, repetibilidad y precisión. Este tipo de actuadores están equipados con sistemas de medición de posición que proveen resolución sub-nanométrica y ancho de banda hasta 10 KHz. Un servo controlador (digital o analógico) determina el voltaje a enviar al piezo actuador comparando una señal de referencia con la señal real proveniente del sensor de posición.

Existen en el mercado posicionadores multi-eje de lazo cerrado que ofrecen la posibilidad de situar repetidamente un punto dentro de un cubo nanométrico de 1 x 1 x 1. Es importante recordar que tal precisión se obtiene solo si el medio ambiente circundante es controlado, pues cambios

de temperatura y vibraciones pueden causar cambios de posición a nivel nanométrico.

Comportamiento dinámico

Un piezo actuador puede alcanzar su desplazamiento nominal en aproximadamente 1/3 del período de su frecuencia de resonancia. Tiempos del orden de microsegundos y aceleraciones de mas de 10,000 g's son posibles.

Las frecuencias de resonancia de los piezo actuadores industriales confiables están en función inversa al desplazamiento total del actuador. Esto es válido para el piezo actuador sin carga; una carga adicional decrece la frecuencia de resonancia en función de la raíz cuadrada de la masa.

Los piezo actuadores no son diseñados para ser manejados a su frecuencia de resonancia, ya que las altas fuerzas dinámicas pueden dañar la integridad estructural del material cerámico.

REFERENCIAS.

1. Piezoelectric Flexure Elements, <http://www.sensortech.ca/flexure.html>, Sensor Technology Ltd., Canada, 1999.
2. PZT & Piezo Actuator, <http://www.physikinstrumente.com/produkte.html>, PI, Alemania, 1999.
3. K. Kuhnen, H. Janocha, Compensation of Creep and Hysteresis effects of piezoelectric Actuators, <http://www.vdivde-it.de/mst/ARCHIVE/9905/MSRART1.html>, Alemania, 1999.
4. Schäfer, J.; Janocha, H., Compensation of Hysteresis in solid state actuators. Sensors and Actuators A49, (1995), 97-102.
5. Operating Performance of Piezoactuators, <http://www.dynaoptics.com/ctc-600-1/operating-perf-piezoactuators.htm>, Dyna Optic Motion, Canada, 1999.