



ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS

14/10/2004

INTRODUCCIÓN La palabra "piezo" se deriva de la palabra griega $\pi\epsilon\zeta\omega$ que significa estrechar, apretar u oprimir. El descubrimiento de la piezoelectricidad en 1880 por los hermanos Paul Jacques y Pierre Curie es quizá uno de los pilares que eventualmente dieron soporte y cabida a la creación de los circuitos digitales. Descubrieron que cristales asimétricos como el cuarzo y la sal Rochelle (Tartrato de Sodio Potasio) generan una carga eléctrica cuando se les aplica una presión, e inversamente, se obtienen vibraciones mecánicas al aplicar oscilaciones eléctricas a estos mismos.

Poco después de su descubrimiento, los Curies divisaron diversos instrumentos que utilizaban el efecto piezoeléctrico. Uno de estos fue el voltmetro piezoeléctrico, y otro el piezoelectrómetro que eventualmente se convertiría en el instrumento básico utilizado por Pierre y Marie Curie en el trabajo que llevaría al descubrimiento del Radio. En otras formas, el efecto piezoeléctrico permaneció como una curiosidad de laboratorio por más de tres décadas.

Después de los Curies, la primera aplicación del efecto piezoeléctrico fue realizado por el profesor P. Langevin en Francia en 1917. Langevin utilizó platos de cuarzo cortados en forma de X para generar y detectar ondas sonoras en el agua. Su objetivo era proveer un medio para la detección de submarinos y su trabajo llevó al desarrollo del Sonar y a la ciencia del ultrasonido.

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 una señal con una frecuencia en el rango audible es aplicada a un material piezoeléctrico, éste se mueve a la misma frecuencia que la de la señal de CA.

En el campo de la ingeniería el uso más común del fenómeno piezoeléctrico, actualmente en los actuadores piezoeléctricos. Un actuador piezoeléctrico es un dispositivo que produce movimiento aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad

. Los actuadores que utilizan este fenómeno 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 el nanoposicionamiento.

MATERIALES El efecto piezoeléctrico se refiere a la generación de carga eléctrica por un material cristalino cuando éste se somete a una fuerza. El efecto existe en cristales naturales como: el cuarzo (SiO_2), la turmanila, la sal de rochelle. Ya que el efecto piezoeléctrico exhibido por materiales naturales es muy pequeño. Se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas (cerámicos artificiales polarizados), por ejemplo: los materiales cerámicos ferroeléctricos, policristalinos como el BaTiO y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT) y algunos polímeros como PVDF (Polyvinilideno fluoride). Los cerámicos PZT que están 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, ver figura 2) antes de la polarización y después de la polarización exhiben simetría tetragonal (estructura anisotrópica ver figura 3) por debajo 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.

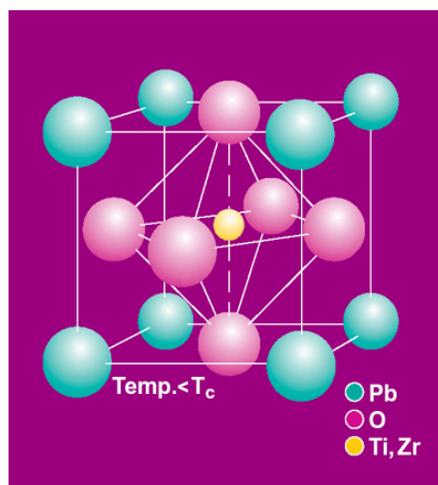


Figura 2

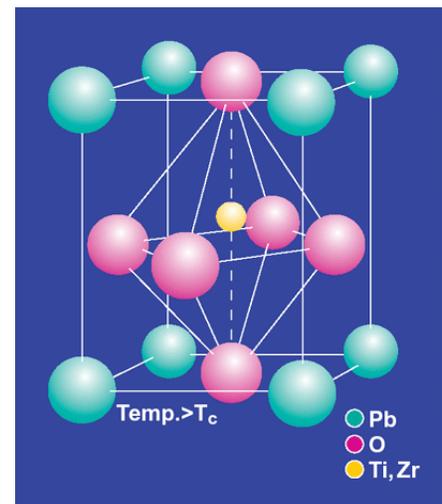


Figura 3

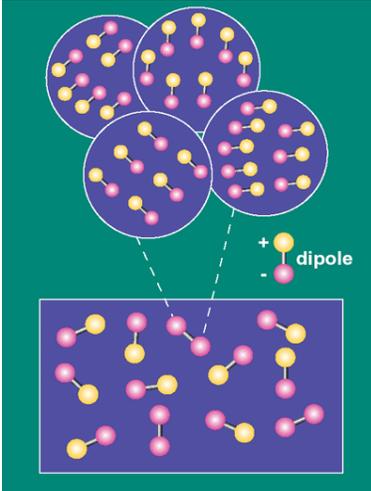


Figura 4

La razón del comportamiento del dipolo eléctrico es la separación entre los iones de carga positiva y negativa. 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. Inmediatamente después de que se forman esos dominios se van agrupando y van formando un momento bipolar mucho más grande (ver figura 4). En el material PZT está formado de muchos dominios de Weiss orientados aleatoriamente en el grueso del material. Esto hace que los dipolos se vayan cancelando y haciendo que el dipolo eléctrico total se haga cero.

Para incrementar las propiedades piezoeléctricas se debe de alinear todos los dominios en una sola dirección. Para este propósito se aplica un campo eléctrico (mayor a 2000 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. 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

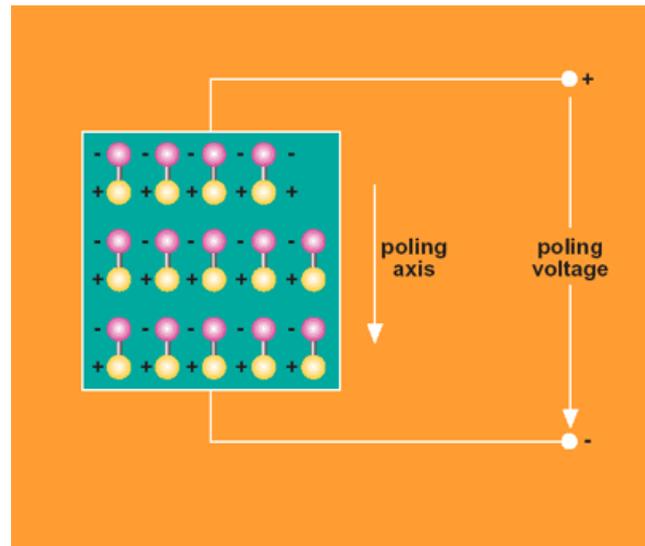
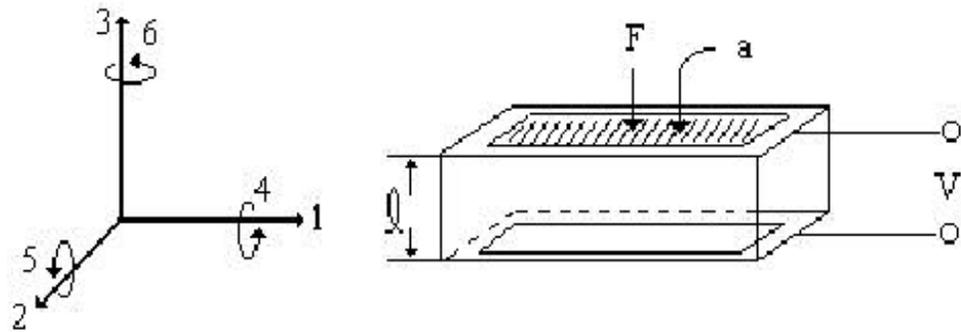


Figura 5

ALGUNAS FÓRMULAS Un sensor piezoeléctrico se convierte en un capacitor al aplicársele electrodos para medir el voltaje generado. Los electrodos ecualizan la carga bajo su área, sin embargo, es posible crear un arreglo de electrodos para hacer la percepción más sensitiva.



El voltaje de un sensor piezoeléctrico es:

$$V = \frac{d_{ii}}{C} Fx = \frac{d_{ii}l}{\xi \xi_0 a} Fx$$

Donde:

- C = es la capacitancia formada,
- Fx = es la fuerza aplicada
- l = es el espesor del cristal,
- a = es el área cubierta por los electrodos
- dii = es un coeficiente piezoeléctrico axial.

Se usan varias constantes físicas con subíndices dobles para describir numéricamente el fenómeno. La convención es que el primer subíndice se refiere a la dirección del efecto eléctrico y el segundo al efecto mecánico.

Las constantes Piezoeléctricas que relacionan el campo eléctrico producido y la tensión mecánica son las siguientes:

$$g = \frac{\text{Campo}}{\text{Esfuerzo}} = \frac{V/l}{F/a}$$

$$d = \frac{\text{Carga}}{\text{Fuerza}} = \frac{Q}{F}$$

$$d = \xi g$$

Donde d y g son
el dii para el cuarzo es 2.03 P coul / Newton

direccionales

RESPUESTA A LA FRECUENCIA Un material Piezoeléctrico que está sujeto a diferentes voltajes con diferentes frecuencias. Presenta una respuesta característica a la variación de la frecuencia. Esto depende de los valores de caracterización del material. Lo que hace que tenga una frecuencia natural de resonancia.

Los transductores piezoeléctricos pueden ser aproximados por el circuito equivalente que se presenta a continuación (figura 9). La frecuencia de resonancia mecánica está en función de los valores de L_1 , C_1 y R_1 y si existe un dieléctrico entre los electrodos también estará en función de su capacitancia eléctrica C_2

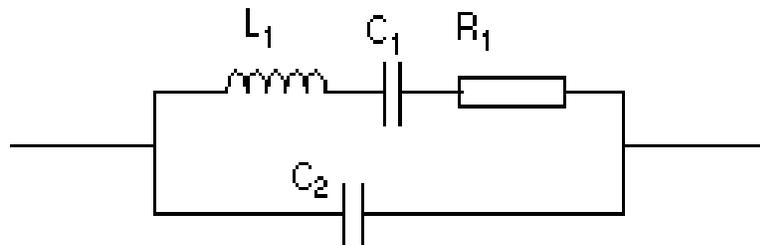


Figura 10

La gráfica que se muestra a continuación (figura 10) muestra como va variando la impedancia en función de la frecuencia. Se muestra como va cambiando de un valor determinado a un mínimo en f_m y un valor máximo en f_n . La frecuencia f_m se le llama frecuencia de antiresonancia y a la frecuencia f_n se le llama frecuencia natural de resonancia

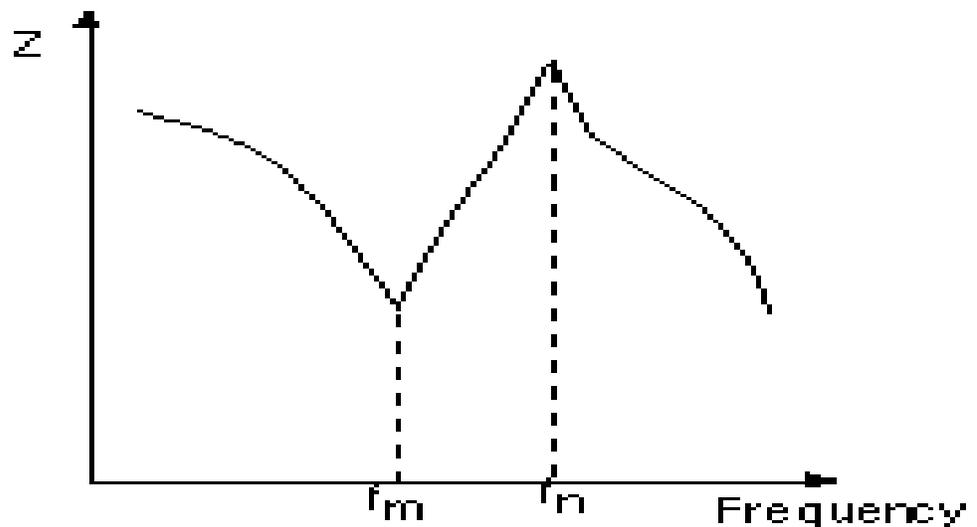


Figura 9

DESPLAZAMIENTO DE PIEZOACTUADORES El desplazamiento de los cerámicos PZT es función de la intensidad de 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_1 de un piezoactuador de una sola capa sin carga puede ser estimado por medio de la ecuación:

$$D_1 = E * D_{ij} * L_o$$

Dónde:

D_1 = es el desplazamiento

L_o = Longitud del cerámico

E = Intensidad del campo eléctrico

D_{ij} = Coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria

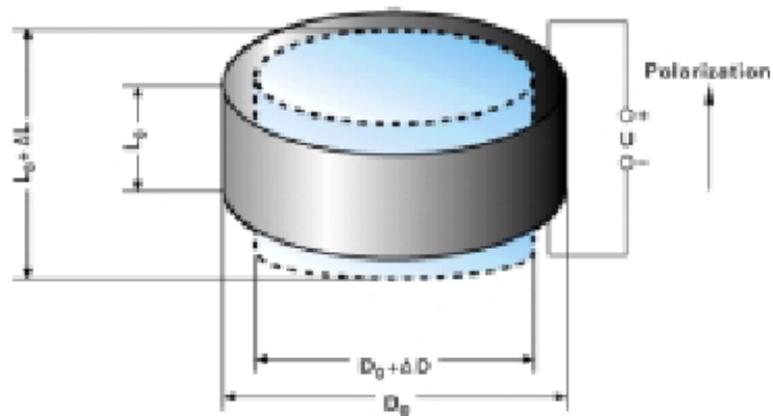


Fig. 3. Elongación y contracción de un disco de PZT cuando se le aplica un voltaje.

Figura 11

HISTÉRESIS Los piezo actuadores de lazo abierto exhiben histéresis. La histéresis 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 histéresis es típicamente del orden de 10 a 15% del movimiento comandado. Ver figura 12

La histéresis se puede eliminar virtualmente en actuadores a circuito cerrado de PZT. Similar a los dispositivos electromagnéticos, los actuadores de lazo abierto exhiben la histéresis. La histéresis se basa en efectos de la polarización de los cristales y efectos moleculares.

En los sistemas PI la histéresis del actuador del piezoeléctrico se compensa completamente. El PI ofrece información absoluta de la posición, así como el movimiento con altas linealidades, capacidad de repetición y exactitud para los sistemas que así lo requieran .

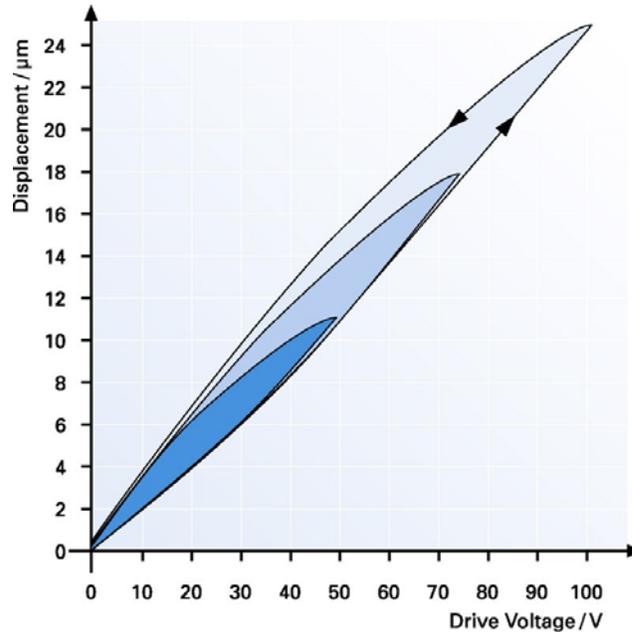


Figura 12

OPERACIÓN EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO Los actuadores de Piezoeléctricos pueden funcionar en lazo abierto y lazo cerrado. En lazo abierto, el desplazamiento corresponde aproximadamente al voltaje manejado. Este modo es ideal cuando la exactitud absoluta de la posición no es crítica o cuando la posición es controlada por los datos proporcionados por un sensor externo. Los actuadores piezoeléctricos del lazo abierto exhiben histéresis y comportamiento de creep

Los actuadores de lazo cerrado son ideales para los usos que requieren altas linealidades, estabilidad a largo plazo de la posición, la capacidad de repetición y la exactitud. Estos sistemas de lazo cerrado PI están equipados con sistemas que miden de la posición que proporcionan la resolución subatómica y un ancho de banda de hasta 10Khz. Un servo controlador (digital o análogo) determina el voltaje de la salida al Piezoactuador comparando una señal de la referencia (posición) a la señal retroalimentada del sensor de la posición real.

Existen en el mercado posicionadores multieje de lazo cerrado que ofrecen la posibilidad de situar repetidamente un punto dentro de un cubo de 1 nanómetro cúbico

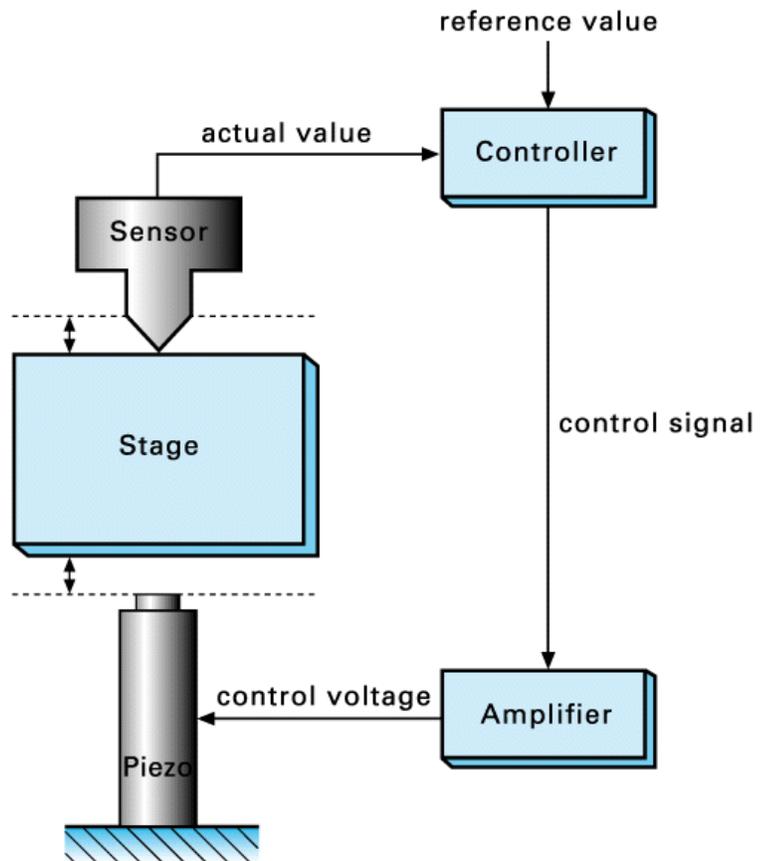


Figura 13

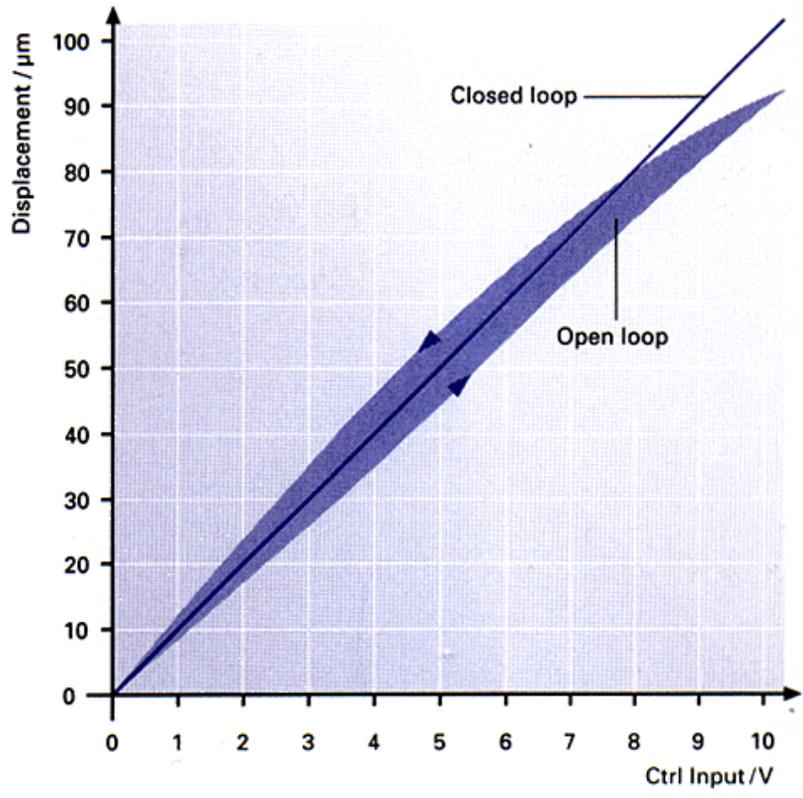


Figura 14

Comportamiento Dinámico Un actuador del piezoeléctrico puede alcanzar su deslocación nominal en aproximadamente 1/3 del período de la frecuencia resonante. Los tiempos de subida en la orden de microsegundos y de aceleraciones de más de 10.000 g's son posibles.

Esta característica permite usos rápidos de la conmutación. Las válvulas del inyector del inyector, las válvulas hidráulicas, los relevadores eléctricos, la óptica adaptante y los interruptores ópticos son algunos ejemplos de los usos de la rápida conmutación.

Las frecuencias resonantes de los actuadores industriales del piezo de la confiabilidad se extienden de algunos diez de kilociclo para los actuadores con el recorrido total de algunos micrones a algunos kilociclos para los actuadores con recorrido más de 100 micrones.

Los actuadores Piezoeléctricos no se diseñan para ser conducidos en la frecuencia resonante, como las altas fuerzas dinámicas que resultan ponen en peligro la integridad estructural del material de cerámico.

VENTAJAS DE LOS ACTUADORES PIEZOELECTRICOS

RESOLUCIÓN:

Puesto que el desplazamiento de un actuador piezoeléctrico se basa en la orientación de dipolos eléctricos en las células elementales del material, la resolución depende del campo eléctrico aplicado y es teóricamente ilimitada. Los cambios pequeños de Infinitesimales en voltaje de se convierten a un movimiento linear.

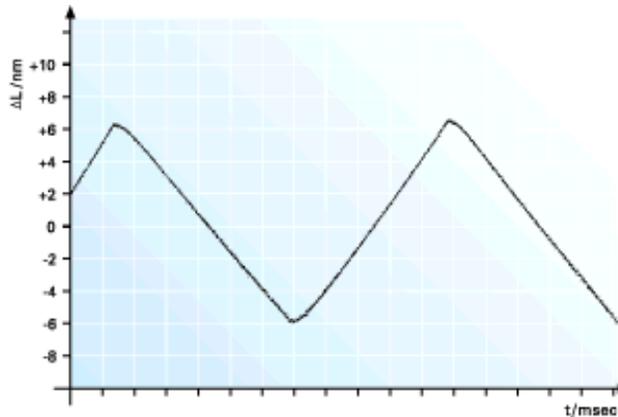


Figura 15

Aquí se muestra una gráfica en la que se desplaza un actuador P-170 HVPZT y al cual se le aplicó una señal triangular de 200Hz y una amplitud de un volt. Se puede notar que la escala de desplazamiento es del orden de los nanómetros. Los actuadores Piezoeléctricos se utilizan en los microscopios atómicos ya que aportan la fuerza para producir el movimiento de una distancia menor que el diámetro de un átomo. Puesto que el desplazamiento es proporcional al voltaje aplicado, la resolución óptima no se puede alcanzar con fuentes ruidosas, inestables del voltaje

GENERACIÓN DE GRANDES FUERZAS

En la mayoría de las aplicaciones, los actuadores piezoeléctricos se utilizan para producir el desplazamiento. Si se utilizan a menos de su carrera, pueden generar fuerzas. La generación de la fuerza se junta siempre con una reducción del desplazamiento. La fuerza máxima (fuerza bloqueada) que un actuador piezoeléctrico puede generar depende de su dureza y del máximo desplazamiento

La fuerza máxima que se puede generar en un bastago infinitamente rígido. Está dada por la siguiente fórmula;

$$F_{\max} = kT \cdot \Delta L_0$$

Donde:

kT es una constante del material

ΔL_0 es el desplazamiento máximo nominal

En la generación máxima de la fuerza, el desplazamiento es cero es cero

EXPANSIÓN RÁPIDA

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

La respuesta rápida es una de las características deseables de los actuadores piezoeléctricos. Los resultados rápidos ante un cambio de voltaje es una posición que cambia rápidamente. Esta característica es necesaria en usos tales como conmutación de válvulas, generación de ondas de choque, sistemas de la cancelación de la vibración, etc. Un Piezo puede alcanzar su desplazamiento nominal en aproximadamente 1/3 del período de la frecuencia resonante.

