Caracterización de Materiales Piezoeléctricos Mediante Interferometría

Julián Humberto Nuñez Castaño^{*} Carlos Andrés Páramo Rojas^{**} Departamento de Física, Universidad de los Andes. Bogotá D.C. - Colombia

(Dated: 9 de mayo de 2019)

Resumen

Los materiales piezoeléctricos se caracterizan por la propiedad de que, al ser sometidos a una diferencia de potencial, su estructura cristalina sufre una deformación debido a tensiones internas generadas por este voltaje. Por lo general, este fenómeno es reversible y funciona de manera inversa (Tensión mecánica que genera una diferencia de potencial). En este trabajo, se tiene como objetivo la caracterización de un piezoeléctrico mediante un interferómetro de Michelson. Esto es con el fin de probar la efectividad del método trabajando sobre un material que ya está bien caracterizado. Esta caracterización consiste en medir, mediante este arreglo experimental, las deformaciones que sufre un piezoeléctrico (Multilayer Piezo Actuator) de 75V. Los cambios en la deformación se pueden evidenciar mediante el movimiento de los máximos y los mínimos de la interferencia generada por el interferómetro. Estos corrimientos de los mínimos serán observados mediante una cámara CCD. La caracterización fue exitosa, ya que las deformaciones medidas corresponden con los voltajes de manera muy cercana a la mostrada en el DataSheet del piezoeléctrico, pese a unos problemas en la rotación de las imagenes.

Palabras Clave: Interferometría, interferómetro Michelson-Morley, Piezoelectricidad, Piezo Actuator, Cámara CCD.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el estudio de materiales piezoeléctricos está muy completo. Ya en los últimos años, la investigación de estos materiales se ha incrementado en gran medida. Esto se debe al sinnúmero de posibles aplicaciones de las propiedades de este tipo de cristales. Una de las aplicaciones más estudiadas actualmente es la relacionada con la construcción de sensores de contacto, importantes para el diseño de sistemas como el del Airbag en los automóviles[3]. Otras aplicaciones importantes es en el campo de las altas energías, en el cual son usados para la construcción de sensores y detectores. En adición, tamnbién la investigación de estos materiales ayuda a la optimización de métodos de generación de energías alternativas aprovechando que, con estos materiales, se puede generar energía eléctrica(Energy Harvesting)[10]. Por esta razón, el trabajo en la caracterización de estos materiales es muy importante, al igual que el desarrollo de mecanismos eficaces y estandarizados para realizar fielmente dichas caracterizaciones. De esta manera existen trabajos como el de Lloyd [7], en el que se busca caracterizar distintos materiales mediante un interferómetro de Michelson usando un fotodiodo como mecanismo para el conteo de mínimos.

En este proyecto se busca realizar un trabajo similar al de Lloyd. En el presente se tiene como objetivo la caracterización de un piezoeléctrico y la evaluación del método con el fin de determinar qué tan bueno es caracterizar materiales piezoeléctricos mediante el procedimiento planteado específicamente en este proyecto. La diferencia con el trabajo de Lloyd es que se usa una cámara CCD. Esto en pro de mejorar la resolución de las medidas, dado que esta cámara un lente muy sensible y pequeño, lo óptimo para evaluar de manera adecuada el patrón de interferencia.De esta manera, se trabajó con un Multilayer Piezo Actuator de 75V el cual ya está bien caracterizado en el DataSheet de THORLABS (que es la empresa proveedora del artefacto).

II. MARCO TEÓRICO

Como material eje de este proyecto debemos tener en cuenta que un piezoeléctrico es un cristal que posee la propiedad de que al ser sometido a una diferencia de potencial. Este mismo deforma su estructura dado que el gradiente de este potencial genera una fuerza electroestática en las moléculas. Esto es posible principalmente a su estructura, la cual no posee centro de simetría. Este hecho hace que, al haber una deformación en la estructura, se crea un desbalance en la distribución de las cargas en el material. Esta descompensación crea unas zonas donde dominan las cargas positivas y otras en donde dominan las cargas negativas. Así, surge la polarización eléctrica y, por ende, la diferencia

^{*}jh.nunez10@uniandes.edu.co

^{**}ca.paramo10@uniandes.edu.co

de potencial. Si hubiese un centro de simetría en la estructura, la estructura se deformaría respecto a este centro, conservando la distribución de carga normal en el material.

Así mismo existe un sentido inverso, el cual es más común en las aplicaciones de este fenómeno. Este proceso contrario consiste en que el material al sufrir deformaciones, o mejor tensiones mecánicas, este genera en sí mismo una polarización eléctrica, que en consecuencia crea una diferencia de potencial. Este sentido del fenómeno es vital para los sensores de contacto ya que, por ejemplo, en un choque automovilístico, la fuerza generada en este momento puede generar un potencial en el piezoeléctrico, que inmediatamente puede ser percibido como una señal eléctrica que active el sistema de Airbag. En este sentido, se debe tener en cuenta que hay dos principales tipos de piezoeléctricos. Por un lado están los piezocerámicos, los cuales tienen propiedades dúctiles que los hacen muy elásticos y son mejores candidatos para los tras ductores acústicos, los cuales son empleados principalmente en sensores de sonido y micrófonos [4]. Por el otro lado, los piezopolímeros no son tan elásticos y poseen una rigidez mínima, lo cual los hace mejores candidatos para poder ser usados en sensores de contacto [3].

Para la caracterización del material piezoeléctrico, aprovecharemos un campo amplio de la óptica que es la interferometría. Esta consta de un conjunto de métodos que, mediante el estudio de la interacción entre distintos rayos de luz incidentes, se pueden obtener distintas formas de medir cantidades físicas aprovechando la superposición de las ondas electromagnéticas, que al estar en desfase generan patrones de interferencia[1]. Para este caso será necesario medir los cambios en las pequeñas deformaciones del material al ser sometido a una diferencia de potencial. Para estas pequeñas deformaciones, se usó un interferómetro de Michelson. Este interferómetro (Fig. 1) es famoso dado que Albert Abraham Michelson y Edward Morley lo utilizaron en con el fin comprobar la existencia del éter; irónicamente con este experimento refutaron la idea de la existencia del éter. A pesar de esto, el experimento ha sido bien caracterizado y ha sido útil en diversos experimentos. En años recientes este interferómetro fue vital para lo que fue la detección de las ondas gravitacionales en 2015 [1].

En nuestro caso, las mediciones serán realizadas en función del número de mínimos observados N. La relación que asocia los cambios de la distancia a un punto del piezoeléctrico se expresa en la ecuación 1:

$$\Delta L = N \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

Donde λ es la longitud de onda del láser o rayo de luz con el que estamos realizando el experimento y ΔL es el cambio de la distancia. Para caracterizar el material como tal se recurre a la relación que define la sensibilidad



Figura 1: Ezquema básico del interferómetro de Michelson [7].

de un material piezoeléctrico.

$$\eta = \frac{\Delta L}{\Delta V} \tag{2}$$

Donde ΔV es la variación del voltaje aplicado al material. Dado que esta expresión de se expresa en términos de los cambios de la distancia y cambios del voltaje aplicado, se espera un comportamiento lineal de las deformaciones en este trabajo. Paralelamente, para mejorar la precisión de las medidas se trabajará con una cámara tipo CCD. Estos CCDs (Dispositivos de cargas acopladas) son unos circuitos integrados, los cuales poseen una gran cantidad de condensadores acoplados, que tienen la capacidad de transmitir cargas eléctricas debidas a fotones incidentes sobre sus celdas mediante el efecto fotoeléctrico. Esto, junto con una apertura muy pequeña, la hace óptima para observar detalladamente regiones a la escala del patrón de interferencia.

III. MARCO EXPERIMENTAL

A. Montaje

El montaje principal de este experimento es el interferómetro de Michelson (ver fig. 2), en el cual se tiene un láser de Neón (de longitud de onda $\lambda = 633nm$), un Beam spliter, 2 espejos (M_1, M_2), un Piezoeléctrico y un cámara CCD (con su respectivo Software de THORLABS e ImageJ).



Figura 2: Esquema del interferómetro del montaje usado.

Para este trabajo se utilizó un Multilayer Piezo Actuator de THORLABS con referencia W138554, de dimensiones $5 \times 5 \times 2$, 4mm. A este piezoeléctrico fue introducido en una base y ahí, con la ayuda de una cinta de doble faz se pegó a un espejo, más exactamente al espejo M_2 el cuál se acercará o se alejará del beam spliter en función de la deformación del piezoeléctrico. De esta manera generará un corrimiento en el patrón de interferencia, que será la cantidad que mediremos con la cámara CCD.



Figura 3: Montaje del interferómetro en el laboratorio.

El funcionamiento de este interferómetro consiste en que el haz incide sobre un Beam-spliter, que lo que hace es dividir el haz. Una parte sigue de largo en la dirección original y otra parte se refleja en dirección perpendicular. Ambas subdivisiones del haz se reflejan y se vuelven a encontrar en el Beam-spliter, y se reflejan en dirección opuesta impactando contra un sensor o una pantalla que evidenciará un patrón de interferencia (en este caso, el sensor es la CCD). Por último, es importante mencionar que para que la interferencia sea más visible a simple vista, ya que el haz del láser es muy delgado, se recurrió a introducir dos lentes, uno de 35mm y otro de 150mm justo después de que el haz salga del generador del láser, con el fin de aumentar el tamaño de la imagen. Para la alineación del interferómetro se contó con la ayuda de unos medidores de altura y unos lentes con iris para asegurar que el haz pasara justo por el centro de cada espejo y cada lente en el interferómetro.

Adicionalmente, para la caracterización de los piezoeléctricos se necesitará de un voltaje que podamos variar en el experimento. Así que para esto dispondremos de un módulo de controlador de piezoeléctricos (Piezocontroller) THORLABS (figura 4), el cual controla los voltajes (con un voltaje máximo de 150V) y las corrientes en el material a caracterizar (THORLABS, s.f.). El piezo ya venía con cables soldables incluídos para conectar a cada salida del piezocontroller, lo que redujo esta parte del montaje a sólo soldar los cables teniendo cuidado con hacerlo en la polaridad correcta.



Figura 4: Piezocontrolador: funcional para controlar el voltaje aplicado al piezoeléctrico.



Figura 5: Piezoeléctrico con sistema de cables similar al usado en el proyecto. [9]

B. Procedimiento

Con el montaje ya dispuesto, la toma de datos se realizó de la siguiente manera: Encendiendo el láser y asegurándose que el interferómetro estuviese totalmente alineado, se enciende el piezocontrolador estando en 0V, de esta manera, cuidadosamente se fue subiendo de a pasos de un voltio (1V), en donde con la CCD y el programa ImageJ se tomaba una fotografía del patrón de interferencia registrado. Esto se realizó hasta los 72V. Desde ahí, de a un voltio se fue bajando de nuevo hasta los OV. Se realizaron 4 veces estos ciclos para asegurarnos que hubo coherencia en las medidas, 3 de ellos con pasos de un voltio, y otro con pasos de 5V. De estos conteos sólo se tuvieron en cuenta 2 de estos ciclos para el análisis, dado que los otros dos se vieron afectados por un problema de la rotación de la imagen. Este problema consistió en que a medida de que se aumentaba el voltaje, la imagen sufría una rotación en sentido horario (al bajar, esta rotación iba en sentido anti-horario) Este corrimiento fue debido a que el espejo y la superficie del piezo no estaban perfectamente perpendiculares al pegarlos, así que por esta razón una cantidad considerable de tomas fueron descartadas.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Obtención del patrón de interferencia y su error experimental

Se logra obtener un patrón de interferencia satisfactorio (Figura 6), el cual nos permite analizar su comportamiento En función del cambio en el voltaje al que está sometido el material piezoeléctrico.



Figura 6: Patrón de interferencia obtenido



Figura 7: Intensidad en la superficie

Ahora, la relación de intensidad sobre la superficie nos permite identificar cuáles son los puntos con mayor intensidad,De esta manera podemos realizar un corte transversal para identificar los máximos y los mínimos en la interferencia. Obviamente, el lente de la cámara y otros factores externos generan ruido en las medidas, tal como se puede observar en la figura 8.



Figura 8: Intensidad en corte transversal

Por esta razón, se recurrió a tomar una foto cuando el láser estuviese apagado, en pro de realizar las mediciones del ruido intrínseco que posee la cámara. A esto se realizaron varios perfiles con ImageJ. Esto, sumado a un análisis estadístico de promedio de intensidad por diferencial de área, se logró suavizar los patrones de interferencia medidos (Figura 9).



Figura 9: Intensidad suavizada en el área del patrón de interferencia

Con este suavizado se toma la evolución temporal para calcular una desviación estándar como cálculo del error frente al ancho en pixeles del pico de interferencia, lo que nos da el error porcentual del comportamiento del pico.



Figura 10: Visualización del pico suavizado

En este caso el ancho del pico es de 215 pixeles, frente a una desviación estándar de 6.44 pixeles, lo que nos da un error porcentual condicionado al ancho del pico de 2.99 %, lo que es un resultado relativamente bajo frente a la aislacion del sistema a interacciones externas.

Figura 11: Evolución temporal del pico por frames



Figura 12: Posición por pixeles del pico

B. Análisis del piezoeléctrico y cálculo de parámetros

Ya con todo montado y con el cálculo del error presentado, se pasa a obtener el desplazamiento generado por los cambios en voltaje sobre el piezo. El cual, nos da desplazamientos muy pequeños ante cambios en voltajes de la escala de un voltio.

Por esta razón se toman el patrón de interferencia del momento inicial y sus siguientes repeticiones en distintos voltajes, lo que nos da que el patrón de interferencia se esta repitiendo cada $9, 10 \pm 0, 03V$, lo que nos da un conteo del paso de mínimos siendo 1 por cada 9V (Dado que las medidas fueron tomadas a escalas de un voltio). A voltaje cero definimos un perfil inicial, el cual está mostrado por la figura 13.Similarmente este punto lo tomaremos como $\Delta L = 0$. De esta manera, mediante los datos vamos caracterizando la diferencia de potencial que es requerida para desplazar el patrón de interferencia media fase (la diferencia que hay entre pico y pico) y de ese modo caracteriza la deformación del piezo.



Figura 13: Inicio conteo de maximos.

En la figura 14 podemos evidenciar cuando el patrón de interferencia se ha desplazado una fase y coincide con el patrón inicial.



Figura 14: Repetición del patrón de interferencia

Lo que teniendo en cuenta la longitud de onda del láser como 632,8nm, nos da una distancia de 316,4nm cada vez que se repite el patrón de interferencia. Y asumiendo un comportamiento lineal, que se ve evidenciado en cada repetición del patrón de interferencia, y al revisar en patrones de interferencia de cortes por voltio, se repite esta interacción lo que nos permite dar a que entre esos puntos la relación es totalmente lineal con una pendiente de 34,76nm por voltio. Para el proceso de ida, que comprende desde los 0V hasta los 72V generamos la gráfica de la figura 15.

Ahora para el caso de la curva de regreso, la representación lineal no es tan realista por lo que es necesario realizar las mediciones de distinta manera. En donde to-



Figura 15: Proceso de ida, deformación en micrómetros $(\pm 0.01 \mu m)$ en voltajes $(\pm 1V)$ desde 0 a 72V.

ca analizar las repeticiones y su desplazamiento generado y observar si cumplen con la curva de histeresis que se debe tener por un estilo de resistencia a mantener el estado anterior. Por lo que se logra observar cierta resistencia a regresar a su pocision inicial (Figura 16).



Figura 16: Proceso de vuelta, deformación en micrómetros $(\pm 0.01 \mu m)$ en voltajes $(\pm 1V)$ desde 72V hasta 0.



Figura 17: Curva de Histéresis DataSheet Piezo Thorlabs. [9]

Estos dos recorridos conforman una curva de histéresis, que si bien no cuenta con un área de histéresis muy grande, sustenta la linealidad aproximada de la teoría, más exactamente predicha por la ecuación 2. Por otro lado, estas gráficas son cercanas a las evidenciadas en el DataSheet del piezoeléctrico (Figura 17). Lo que demostraría que, de manera cualitativa y preliminar, este procedimiento de caracterización de piezoeléctricos es confiable para piezos que no estén tan caracterizados como el de este trabajo.

V. CONCLUSIONES

- Se logra obtener un patrón de interferencia adecuado para realizar las distintas mediciones.Este patrón de interferencia se muestra como un patrón de lineas paralelas, lo que demuestra que el interferómetro estaba alineado de manera óptima.
- Se logra observar la curva de histéresis en el regreso, aunque con muy pocos datos de análisis, pues es mas complejo establecer la relación a voltaje en esta.
- A pesar de las rotaciones obtenidas por dificultades en el montaje, y el ruido producido principalmente por polvo en la cámara, se logra suavizar las gráficas mediante promediación de área y así obtener resultados confiables.
- Se logra sacar de forma aproximada una interacción lineal del piezoelectrico, frente al voltaje y el desplazamiento. Esto concuerda con lo predicho por la definición de sensibilidad piezoeléctrica. Y de manera muy próxima concuerda con lo registrado en el DataSheet del piezo. Lo cual hace pensar de manera preliminar que este procedimiento puede brindar caracterizaciones de piezoeléctricos de manera sencilla y confiable.
- En pro de fortalecer los resultados de este trabajo, se espera trabajar en un futuro con más piezoeléctricos bien caracterizados para determinar con mayor exactitud la fiabilidad de la caracterización de este procedimiento. .

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Departamento de Física Universidad de los Andes: Guía Interferometría. https://sicuaplus.uniandes.edu.co
- [2] Ferrer, J. F. (2015). Caracterización de sensores piezoeléctricos y capas de adaptación (matching layer) para detectores de partículas tipo PICO. UNI-VERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA.

- [3] Fundación Española para laCien-(2010).ciaу latecnología FECYT. Materiales Piezoeléctricos. Obtenido de meter. https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt_mat_n3.pdf
- [4] Gautschi, G. (2002). Piezoelectric Sensorics: Force Strain Pressure Acceleration and Acoustic Emission Sensors Materials and Amplifiers. Zurich, Suiza.: Springer.
- [5] GUACA VERA, J. A., LEON VILLEGAS, F. A. (25 de Enero de 2018). CARACTERIZA-CIÓN DE LA RESPUESTA PIEZOELÉCTRICA DE UN POLÍMERO NANOREFORZADO CON GRAFENO. Ocaña, Norte de Santander.
- [6] Nicolás Morales Durán, L. A. (2014). Interferómetro de Mach-Zehnder. Bogotá, Colombia.

- [7] S. Lloyd, M. P. (2010). Characterization of a Piezoelectric Buzzer Using a Michelson Interferometer.
- [8] Sherrit, S., Mukherjee, B. K. (2007). Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers
- [9] THORLABS. (s.f.). Open-Loop Piezo Controllers and Low-Voltage Shear Piezoelectric Chips and Stacks. Obtenido de https://www.thorlabs.com
- [10]Francisco Jiménez , Jose de Frutos, David Alonso, Manuel Vázquez. Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting