

AMPLITUD FOTOACÚSTICA DE UN PZT IRRADIADO CON PULSOS LÁSER UV-VIS DE DIFERENTE ENERGÍA

Photoacoustic amplitude of a PZT irradiated with different energy UV-VIS laser pulses

Claver Aldama-Reyna^{1*}, Jennifer Aldama-Guardia², Luis Zelada-Abanto¹

Departamento Académico de Física. Universidad Nacional de Trujillo¹, Egresada de Escuela de Física. Universidad Nacional de Trujillo²
claveraldama@gmail.com*

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo general determinar experimentalmente la dependencia entre la amplitud de la señal fotoacústica (voltaje pico) producida por un sensor piezoeléctrico tipo PZT y la energía de los pulsos láser ultravioleta y visible incidentes sobre el sensor. El arreglo experimental incluye un PZT de forma cilíndrica de 8 mm de diámetro, 3 mm de espesor y frecuencia de resonancia de 220 kHz. Le fue adherida una placa de aluminio ennegrecida, conectado directamente a un osciloscopio y con una interfase a una computadora portátil. Como fuente de radiación láser se usó un láser Nd: YAG con dos armónicos (355 nm y 532 nm). Para la medida de la energía de los pulsos láser se usó un medidor con sensor piroeléctrico. El rango de valores de energía por pulso estuvo comprendido desde cero hasta aproximadamente 5 mJ. Los resultados muestran una dependencia lineal entre el voltaje pico de la señal fotoacústica y la energía del pulso láser. La sensibilidades obtenidas fueron $(125.2 \pm 0.3) \text{ mV/mJ}$ para 532 nm y $(167 \pm 4) \text{ mV/mJ}$ para 355 nm. Se concluyó que el PZT es muy sensible a los cambios de energía de láseres pulsados, su respuesta es directamente proporcional a la energía incidente y representa una alternativa viable para ser usado como detector de energía de pulsos láser.

Palabras clave: Amplitud fotoacústica, PZT, pulso láser.

ABSTRACT

The main objective of this research is to experimentally determine the dependence between photoacoustic signal amplitude (peak voltage) produced by a piezoelectric sensor type PZT and the energy of ultraviolet and visible laser pulses over the sensor. The experimental setup includes a cylindrical PZT of 8 mm diameter, 3 mm thickness and 220 kHz resonance frequency. A black aluminum plate was adhered to the PZT and PZT was connected to an oscilloscope which was connected to a laptop throughout an interface. The radiation source was a Nd:YAG laser with two harmonics (355 nm and 532 nm). The energy of laser pulse was measured by an energy meter with a pyroelectric sensor. Energy values were approximately in the range 0-5 mJ. Results show linear relation between pick voltage of photoacoustic signal and energy of laser pulse. The obtained sensibilities were $(125.2 \pm 0.3) \text{ mV/mJ}$ for 532 nm and $(167 \pm 4) \text{ mV/mJ}$ for 355 nm. In conclusion, PZT is very sensitive to energy changes of pulsed lasers. It has a proportional response to incident energy, and it represents a viable alternative to be used as an energy detector for laser pulses.

Key words: Photoacoustic amplitude, PZT, laser pulse.

Recibido: 27 mayo de 2015

Aceptado: 19 de octubre de 2015

INTRODUCCIÓN

El “escuchar el sonido de la luz” fue un fenómeno desconocido antes del año 1880. Este fenómeno denominado “efecto fotoacústico” fue descubierto accidentalmente por Alexander Graham Bell a fines del siglo XIX y se reportó por primera vez en 1880 como consecuencia de sus investigaciones sobre el fonógrafo. La historia sobre el desarrollo de este efecto y las teorías desarrolladas hasta 1980 se puede encontrar en el libro de Rosencwaig¹. En términos generales la fotoacústica se puede entender como la generación de ondas acústicas u otros efectos termoelásticos por cualquier tipo de radiación energética, incluyendo radiación electromagnética desde la frecuencia de radio hasta rayos x, electrones, protones, iones y otras partículas.

La generación de ultrasonido por radiación láser fue demostrada por primera vez en 1963 por White² y desde ese momento ha sido utilizado para generar ultrasonido en sólidos, líquidos y gases en numerosas aplicaciones. Para mayor información sobre la generación ultrasónica por láser remitimos al lector a los textos de Scruby y Drain³, Hutchins⁴ y Krishnaswamy⁵. Cuando un pulso láser incide sobre un material es parcialmente absorbido. La potencia óptica que es absorbida por el material es convertida en calor, llevando a un rápido aumento de temperatura localizada. Esto da lugar a una expansión térmica rápida de la región local, causando así la generación de ultrasonido en el medio.

Si la potencia óptica es baja, suficiente para que el material no se funda y ablaque, el régimen de generación es llamado termoelástico, es decir que la superficie irradiada no se modifica ya que los pulsos láser son de baja potencia y la fuente acústica generada por el calor depositado en la superficie del material debido a la expansión térmica está caracterizada por dos fuerzas bipolares paralelas a la superficie. Si la potencia óptica es suficientemente alta para fundir al material y formar plasma, una vez más se genera ultrasonido, pero en este caso por la transferencia de momento de la eyección del material, este régimen de generación es llamado régimen de ablación; aquí las fuerzas generadas son normales a la superficie irradiada y se genera plasma. Este régimen no será estudiado, puesto que los experimentos realizados se trabajaron en el régimen termoelástico.

La energía puede propagarse en sólidos, líquidos y gases como ondas acústicas. En fluidos puede haber

en general un modo de propagación de ondas longitudinales, el cual toma la forma de alternar compresiones y rarefacciones (también conocidas como ondas de compresión). Las ondas acústicas se propagan a la velocidad característica del medio fluido. En sólidos elásticos (la mayoría de metales) es más complicada. El medio ahora se puede acomodar a ondas transversales, además de ondas longitudinales.

Hay muchas formas de generar y detectar ultrasonido pero la más común es usando transductores piezoeléctricos. Si un material piezoeléctrico está sometido a tensiones o presiones, sus lados se cargarán electrostáticamente, generando una diferencia de potencial. Los materiales piezoeléctricos más comunes son los cerámicos como el zirconato titanato de plomo (PZT).

Los estudios teóricos sobre la generación de ondas ultrasónicas por radiación láser se han ido mejorando tal como indica Sanderson, Ume y Jarzynski.⁶ A su vez, desde 1998 hasta la actualidad estos modelos se han ido perfeccionando, según los adelantos o descubrimientos experimentales, los cuales se clasifican en dos grupos: los del régimen termoelástico, donde no hay daño ni modificación del material irradiado y el régimen de ablación donde si hay cambios físicos y/o químicos sustanciales.

Como se puede apreciar, existen numerosos trabajos que tratan el problema de la generación de ondas acústicas en un medio, originada por la absorción de la luz. Sin embargo, para el caso en que las muestras tienen baja absorción óptica y el pulso es suficientemente corto como para desprestigiar la difusión térmica, el modelo fenomenológico desarrollado por Patel y Tam⁷ y Tam⁸ es aplicable.

Cuando una radiación de determinada energía incide sobre un material, este absorbe una parte de esa radiación produciéndose una excitación de los átomos o moléculas que lo componen, los que son llevados de su estado fundamental a un estado de mayor energía (absorción). Estas especies decaen mediante distintos mecanismos.

Los mecanismos de desactivación no radiativos que no dan lugar a reacciones químicas, generan calor que ha sido excitada por la radiación incidente. Si esta excitación tiene carácter modulado o pulsado, el calor producirá variaciones de densidad en el medio, originando así, ondas de presión y por consiguiente

ondas acústicas, que se propagan fuera de la fuente y que pueden ser detectadas mediante métodos ópticos⁹ o mediante micrófonos, sensores piezoeléctricos y otras técnicas⁸.

En el caso en que se empleen transductores piezoeléctricos para la detección, la señal eléctrica generada, V_s (voltaje de salida) en la muestra es proporcional a la onda de presión $p(r)$ de forma que:

$$V_s = \text{const. } p(r) \quad (1)$$

Así, la señal acústica registrada está dada por:

$$V_s = K\delta E_0(1 - 10^{-A}) \quad (2)$$

donde K es una constante que incluyen las propiedades termoelásticas del medio y la respuesta del detector. La ecuación (2) representa la señal fotoacústica obtenida para una eficiencia calórica $\bar{\delta}$,

una energía de excitación E_0 y una absorbancia A de la muestra. En este trabajo definiremos a $K\delta(1 - 10^{-A})$ como la responsividad del material⁸.

En lo que respecta a investigaciones similares en el contexto internacional se tienen muy pocas siendo la de Villagrán y Zaragoza¹⁰ la más cercana, ellos trabajaron con un láser pulsado y un transductor piezoeléctrico PZT unido a un espejo, para obtener el espectro de absorción de muestras sólidas y líquidas. Otra publicación es la de Perez et al.¹¹ quienes presentaron resultados obtenidos de la señal fotoacústica cuando se varía la longitud de los cristales piezoeléctricos, manteniendo constante los demás factores experimentales. En tal sentido, el presente trabajo tiene como objetivo investigar experimentalmente la amplitud fotoacústica de un PZT irradiado con pulsos láser UV-VIS de diferente energía.

MATERIAL Y MÉTODOS

El objeto de estudio fue un tipo de sensor piezoeléctrico construido en base a una cerámica piezoeléctrica denominado PZT que son las siglas en idioma inglés de las palabras zirconato-titanato de plomo con frecuencias de resonancia de 220 kHz (para pulsos láser de 532 nm) y 200 kHz (para 355nm).

En la Fig.1 se presenta un esquema completo de un sensor piezoeléctrico (SP) diseñado por Patel y Tam⁷ y que es el mismo que se ha usado en este trabajo. Este consta de una cerámica piezoeléctrica de forma cilíndrica (8 mm de diámetro y 3mm de espesor) y polarizada, que está pulida axialmente y plateada en sus extremos, que sirve para hacer el contacto con la carcasa de metal. La parte del sensor que hace

contacto con el cilindro PZT por su extremo interno, está totalmente pulida, para un mejor contacto y transmisión de la señal acústica. La parte superior del cilindro PZT está adherido a un cilindro de plomo soldado a un disco de cobre y a un resorte que va hacia el conector. El uso del plomo, que tiene alta atenuación ultrasónica, permite reducir las reflexiones posteriores en los sensores PZT y así reducir los efectos resonantes. Una delgada capa de grasa de silicio es aplicada entre el cilindro PZT y el lado interior plano de la carcasa y el cilindro de plomo, para un mejor acoplamiento. La señal fotoacústica es transmitida mediante un resorte al punto del conector BNC.

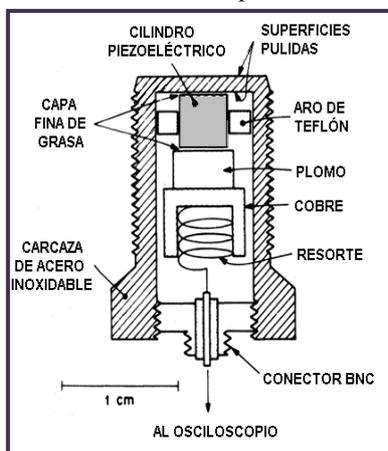


Fig. 1. Esquema de la sección transversal del sensor piezoeléctrico diseñado por Patel y Tam.⁷

A este SP se le pegó una pequeña placa de aluminio de espesor (1.35 ± 0.05) mm pintada de negro.

El tipo de láser con el que se trabajó es un láser de estado sólido Nd: YAG (Neodymium: Yttrium-Aluminum-Garnet) de la firma Quantel tipo Brilliant (clase 4) con modo de operación denominado Q-switch, el cual permite tener pulsos cortos del orden de 4-6 ns así como variar la energía por pulso mediante la variación del tiempo de retraso del Q-switch o delay. Este tipo de láser fue sintonizado para dos longitudes de onda, una en el rango visible (532 nm) y otra en el ultravioleta (355 nm).

Para el registro de las señales eléctricas producidas por el sensor PZT al ser irradiado con los pulsos láser se usó un osciloscopio digital de ancho de banda 500 MHz, 2.5GS/s marca Tektronix, tipo DPO 3054 con cuatro canales analógicos y que fue conectado a una computadora portátil marca HP, tipo HP450 con la cual se podía grabar y procesar las señales eléctricas (señales fotoacústicas) mediante el programa de computo OriginPro 8.5. También se usó un fotodiodo de respuesta rápida para activar el osciloscopio.

Para medir la energía de la radiación láser pulsada se utilizó un medidor de energía marca Newport, modelo 1936-R con detector piroeléctrico 818E-03-12-F.

Para los arreglos experimentales se usaron algunos accesorios tales como láminas de vidrio de área 25.4×76.2 mm² y espesor 1-1.2 mm; un goniómetro marca Newport, serie M-481-A-S con rotación fina de 360° y escala graduada en grados sexagesimales (micrómetro incluido); un posicionador XY marca Newport, con tornillos micrométricos de 13 mm de recorrido en cada eje y movimiento con dos grados de libertad; un prisma marca Leybold de sección trapezoidal y gafas protectoras marca Newport para proteger la vista de las radiaciones UV, visible e IR procedente del láser.

Para caracterizar las respuestas fotoacústicas del sensor PZT se hicieron dos arreglos experimentales, uno para radiación visible de 532nm y otro para radiación ultravioleta de 355 nm. La Fig. 2 corresponde al arreglo experimental usado para radiación láser visible de 532 nm.

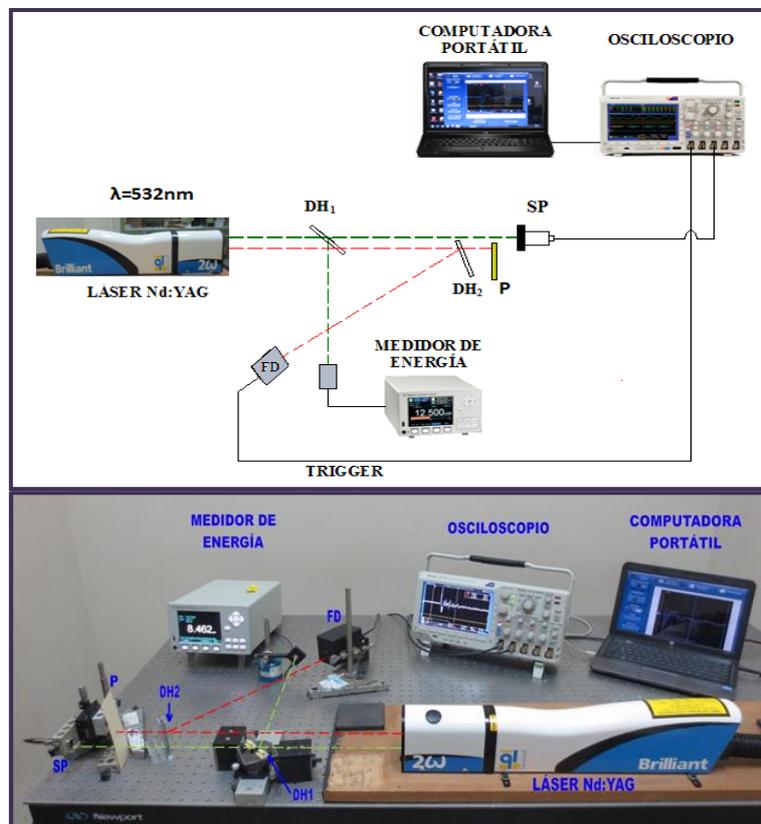


Fig. 2. (Arriba) Arreglo experimental usado para la determinación de la respuesta fotoacústica del SP con placa de aluminio negra irradiada con pulsos láser visible, (abajo) fotografía del montaje experimental, donde: DH1, DH2: divisores de haz, FD: fotodiodo, SP: sensor piezoeléctrico con placa de aluminio pintada de negro, P: pantalla.

Una vez calibrados los equipos se procedió sistemáticamente a controlar la energía por pulso mediante el delay del láser con valores entre 400 μ s y 320 μ s.

Para el caso de radiación láser pulsada UV de 355 nm se usó el arreglo experimental mostrado en la Fig. 3, donde ahora al láser Nd:YAG (armónico fundamental), se le acopló el segundo armónico 2ω (sin dicroico) y el tercer armónico 3ω (con dicroico) obteniendo de esta manera la longitud de onda de 355nm. En este caso, la radiación ultravioleta salía junto a la radiación visible, por lo que se tuvo que hacer uso de un prisma para

poder separarlas. Para la toma de datos el delay utilizado estuvo entre 380 μ s y 300 μ s, registrándose 10 señales fotoacústicas por cada delay con su respectiva energía.

Los datos obtenidos del voltaje pico y de la energía para cada delay fueron procesados estadísticamente obteniéndose sus valores medios y sus correspondientes desviaciones estándar. Luego se graficó el voltaje pico de las señales fotoacústicas del SP en función de la energía por pulso de la radiación láser incidente sobre el sensor piezoeléctrico PZT.

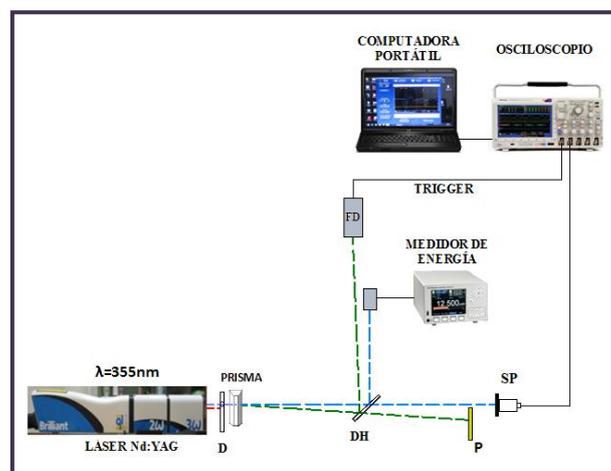


Fig. 3. Arreglo experimental usado para la determinación de la respuesta fotoacústica del SP con placa de aluminio negra irradiada con pulsos láser ultravioleta. DH: divisor de haz, FD: fotodiodo, SP: sensor piezoeléctrico con placa de aluminio pintado de negro, P: pantalla, D: diafragma.

RESULTADOS

En la Fig. 4 se presentan 5 señales representativas de voltaje versus tiempo del sensor PZT para diferentes energías de los pulsos láser UV (355 nm). Se han mantenido sus escalas originales pero desplazadas verticalmente para poder apreciar la variación de la amplitud de acuerdo con la energía de los pulsos láser.

En la Fig. 5 se presentan las mismas curvas experimentales mostradas en la Fig. 4 pero con el voltaje normalizado para poder comparar la forma de las señales fotoacústicas pudiéndose apreciar que la forma no cambia con la energía de los pulsos láser y esto se puede cuantificar haciendo un análisis de correlación estándar y correlación de estabilidad entre las señales fotoacústicas, cuyos resultados se muestran en la Fig. 6. Finalmente en la Fig. 7 se

muestra la curva experimental del voltaje pico de las señales fotoacústicas del sensor PZT en función de la energía de los pulsos láser de 355 nm con una relación lineal con coeficiente de correlación lineal de 0.9987 y una constante de proporcionalidad de (167 ± 4) mV/mJ y un factor de corrección de (-3.7 ± 1.4) mV.

En la Fig. 8 se presentan algunas señales de voltaje versus tiempo del sensor PZT para diferentes energías de los pulsos láser de 532 nm. Se han mantenido sus escalas originales pero desplazadas verticalmente para poder apreciar la variación de la amplitud de acuerdo con la energía de los pulsos láser. En la Fig. 9 se presentan las mismas curvas experimentales mostradas en la Fig. 8 pero con el voltaje normalizado para poder comparar la forma de las

señales fotoacústicas pudiéndose apreciar que la forma no cambia con la energía de los pulsos láser lo cual es corroborado de manera cuantitativa mediante un análisis de correlación estándar y correlación de estabilidad entre las señales fotoacústicas. Los resultados de la correlación se muestran en la Fig 10. Finalmente en la Fig. 11 se muestra la curva experimental del voltaje pico de las señales fotoacústicas del sensor PZT en función de la energía de los pulsos láser de 532 nm con una relación lineal con coeficiente de correlación lineal de 0.9977 y una constante de proporcionalidad de (125.2 ± 0.3) mV/mJ y un factor de corrección de (-0.81 ± 0.10) mV. Las señales fotoacústicas obtenidas con el sensor PZT que fue irradiado con disparos láser de longitudes de onda de 355nm y 532nm y con energías

de hasta 5mJ por pulso han demostrado una gran sensibilidad capaz de detectar pulsos láser de hasta 10 μ J, esto se deduce de las constantes de proporcionalidad obtenidas de las curvas experimentales de voltaje pico versus energía de los pulsos láser. Sin embargo a pesar de todas las precauciones en la calibración y toma de datos las curvas experimentales si bien es cierto dieron una relación lineal entre las variables no interceptaban al origen de coordenadas habiendo un pequeño desplazamiento lo cual se atribuye al ruido electrónico inherente a los cables de conexión. La dependencia lineal obtenida nos demuestra que se está por debajo del umbral de ablación del material irradiado que en este caso fue una placa de aluminio pintada de negro que cubría al sensor PZT.

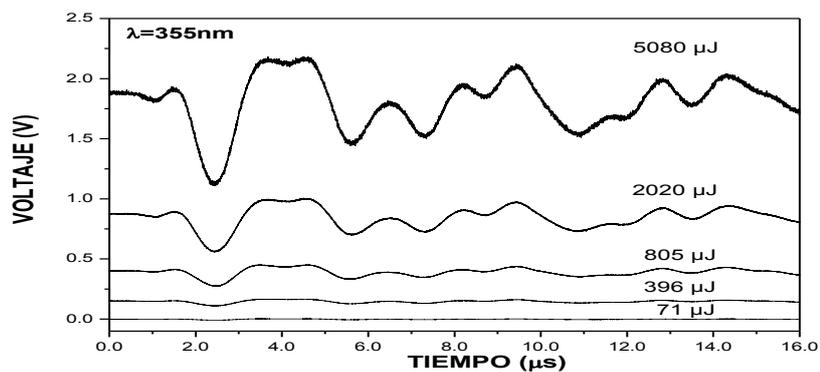


Fig. 4. Señales fotoacústicas de voltaje versus tiempo obtenidas con un sensor PZT irradiado con pulsos láser de 355 nm de longitud de onda y diferente energía. Las curvas han sido desplazadas en el eje vertical para poder apreciar el cambio de su amplitud en función de la energía de los pulsos láser.

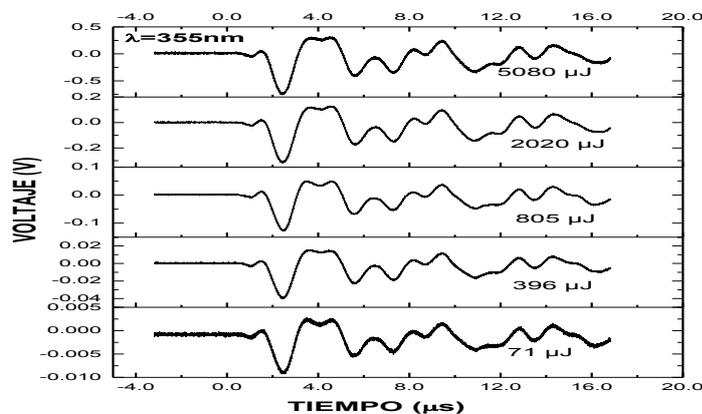


Fig. 5. Señales fotoacústicas de voltaje versus tiempo obtenidas con un sensor PZT irradiado con pulsos láser de 355 nm de longitud de onda y diferente energía. Las escalas de voltaje han sido normalizadas para poder comparar la forma de las señales lo cual no se puede apreciar en la curvas de la Fig. 4.

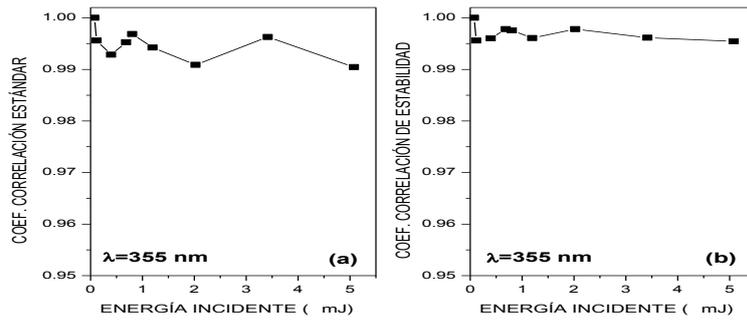


Fig. 6. (a) Curva correspondiente al análisis de correlación estándar entre las señales fotoacústicas del sensor PZT irradiado con pulsos láser de 355 nm de longitud de onda y de diferente energía. (b) Curva correspondiente al análisis de correlación de estabilidad entre las señales fotoacústicas del sensor PZT irradiado con pulsos láser de 355 nm de longitud de onda y de diferente energía.

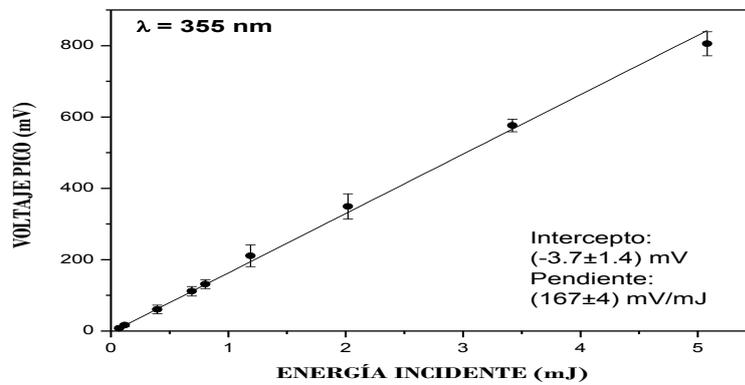


Fig. 7. Curva experimental del voltaje pico de las señales fotoacústicas del sensor PZT en función de la energía de los pulsos láser de 355 nm.

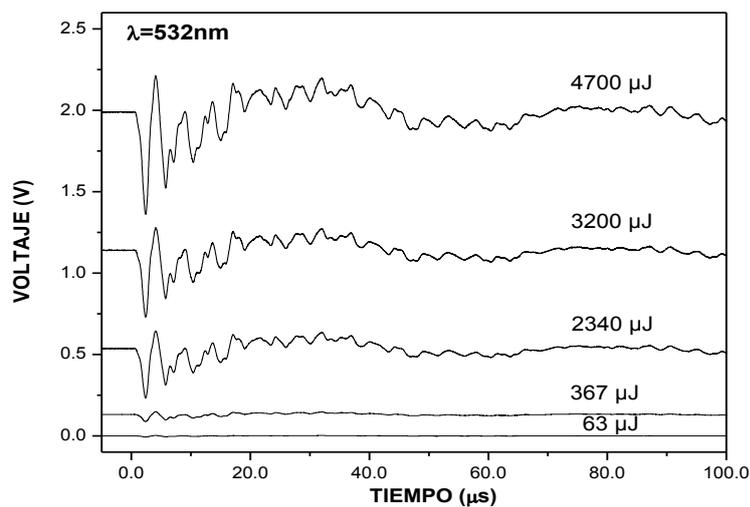


Fig. 8. Señales fotoacústicas de voltaje versus tiempo obtenidas con un sensor PZT irradiado con pulsos láser de 532 nm de longitud de onda y diferente energía. Las curvas han sido desplazadas en el eje vertical para poder apreciar el cambio de su amplitud en función de la energía de los pulsos láser

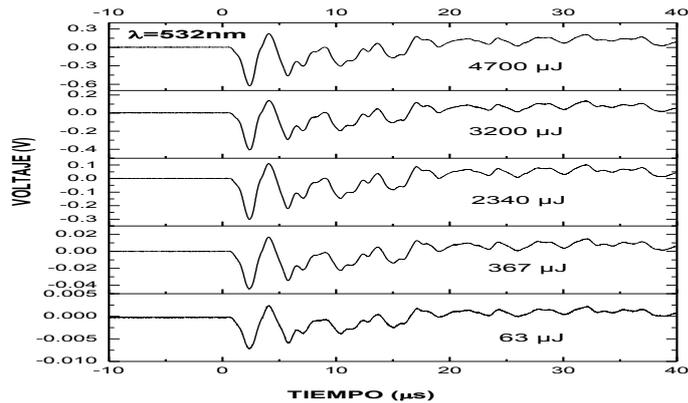


Fig. 9. Señales fotoacústicas de voltaje versus tiempo obtenidas con un sensor PZT irradiado con pulsos láser de 532 nm de longitud de onda y diferente energía. Las escalas de voltaje han sido normalizadas para poder comparar la forma de las señales lo cual no se puede apreciar en la curvas de la Fig. 8.

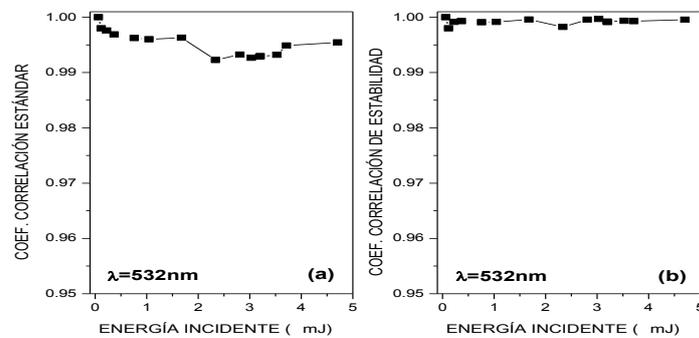


Fig. 10. (a) Curva correspondiente al análisis de correlación estándar entre las señales fotoacústicas del sensor PZT irradiado con pulsos láser de 532 nm de longitud de onda y de diferente energía. (b) Curva correspondiente al análisis de correlación de estabilidad entre las señales fotoacústicas del sensor PZT irradiado con pulsos láser de 532 nm de longitud de onda y de diferente energía.

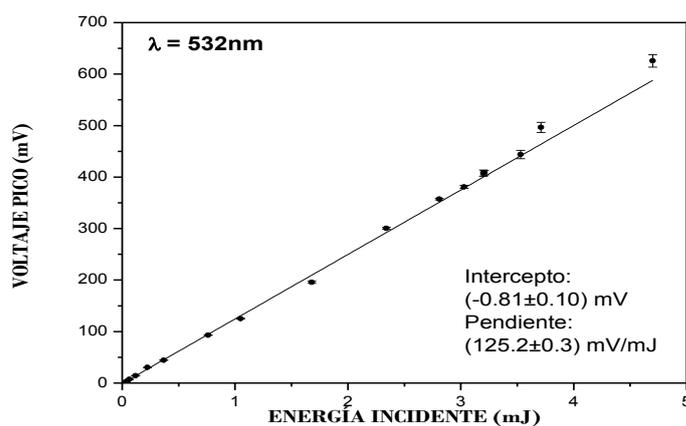


Fig. 11. Curva experimental del voltaje pico de las señales fotoacústicas del sensor PZT en función de la energía de los pulsos láser de 532 nm.

DISCUSIÓN

Los resultados más importantes mostrados en las Fig. 7 y 11 (curvas experimentales del voltaje pico de las señales fotoacústicas del sensor PZT en función de la energía de los pulsos láser de 355 nm y 532 nm respectivamente) corroboran dentro del margen de error experimental la relación predicha por la Ec. (2) del modelo fenomenológico desarrollado por Patel y Tam⁷ y Tam⁸. Esta afirmación se sustenta en los valores encontrados experimentalmente (0.9977 y 0.9987) para los coeficientes de correlación lineal correspondientes a la relación entre el voltaje pico de las señales fotoacústicas y la energía de los pulsos láser UV y visible. Este hallazgo concuerda con los resultados experimentales obtenidos por otros autores, tales como Villagrán y Zaragoza¹⁰ quienes demostraron que se obtiene una relación lineal entre la amplitud de la señal acústica detectada en tiempo real a la salida de la cavidad y la energía de salida del láser en su trabajo de investigación relacionado a la medición fotoacústica de la energía de intracavidad en láseres pulsados. También, Perez, et al.¹¹ hallaron una dependencia lineal entre la señal fotoacústica y la energía para un detector PZT de 4.2mm de longitud, pero en sus curvas experimentales de la señal fotoacústica versus energía para el detector PZT lo presentan en unidades arbitrarias; Bielecki et al.¹² desarrollaron un método de medición de energía de radiación láser usando un convertidor fotoacústico encontrando una dependencia lineal entre el pico del valor del voltaje de salida y la energía del pulso láser en un rango de energías comprendido entre 5 y 150 mJ.

En nuestro trabajo se desconoce cuál será la respuesta del PZT para el caso de energías superiores a 5 mJ. Por limitaciones instrumentales no ha sido posible investigar la respuesta fotoacústica del PZT para otras longitudes de onda en el rango visible y ultravioleta,

por otro lado tampoco se ha ensayado con otros sensores PZT de otras frecuencias, sin embargo los resultados obtenidos con este sensor son reproducibles en el rango de energías de hasta 5 mJ y para longitudes de onda de 355 nm y 532 nm.

Uno de los aportes originales es enriquecer el conocimiento del uso de sensores PZT como detectores de radiación láser pulsada es el haber incluido el análisis de correlación estándar y de estabilidad entre las señales fotoacústicas mostrado en las Figs. 6 y 10 que permiten cuantificar el cambio en la forma de las señales fotoacústicas. Los coeficientes de correlación estándar y de estabilidad encontrados son superiores a 0.99, lo cual es muy aceptable puesto que el valor 1.00 indica que no ha habido ningún cambio de forma de la señal; siendo el cambio en la amplitud de la señal fotoacústica, el único cambio perceptible y medible, que según la Ec. (2) se atribuye al cambio en la energía del pulso láser. Además la magnitud de los valores de las amplitudes de las señales fotoacústicas obtenidas con el sensor piezoeléctrico son lo suficientemente grandes (hasta 800 mV) como para ser detectados por un osciloscopio, lo cual nos da la ventaja de no requerir de ningún amplificador de señales y esto conlleva al montaje de un dispositivo sencillo con un mínimo de equipos y con un sensor de bajo costo. Otra de las características del tipo de sensor PZT es que tiene sensibilidad solo para la radiación láser pulsada y no hay interferencia con ruidos acústicos ni la radiación emitida por otras fuentes luminosas tales como los fluorescentes del ambiente donde se realizan las mediciones y esto permite hacer mediciones en condiciones de visibilidad y no a oscuras como ocurre con otro tipo de sensores como los piroeléctricos.

CONCLUSIONES

La dependencia entre la amplitud de la señal fotoacústica (voltaje pico) producida por un sensor piezoeléctrico tipo PZT y la energía de los pulsos láser ultravioleta (355 nm) y visible (532 nm) incidentes el sensor es una función lineal en el rango de energías menores a 5mJ.

El tipo de sensor piezoeléctrico (PZT) es muy apropiado para mediciones de energía de láseres

pulsados en tiempo real por su respuesta rápida y además presenta la ventaja de no verse afectado por ruidos acústicos ni condiciones de iluminación del laboratorio es decir que no se requiere necesariamente oscuridad para las mediciones de energía.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Dra. Elsi Mejía Uriarte de la UNAM-México por haber proporcionado el sensor PZT y MSc. Miguel Valverde Alva por haber orientado en el análisis de correlación de señales fotoacústicas y haber apoyado con bibliografía especializada, así mismo se agradece como institución al Laboratorio de Óptica y Láseres de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional de Trujillo en cuyas instalaciones se realizó la parte experimental de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rosencwaig A. Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy. USA: John Wiley&Sons Inc; 1980.
2. White R. Generation of elastic waves by transient surface heating. J Appl Phys 1963; 34(12): 3559-67.
3. Scruby C, Drain L. Laser ultrasonics: techniques and applications. Great Britain: Adam Hilger; 1990.
4. Hutchins D. Ultrasonic generation by pulsed laser. En: Mason WP, Thurston RN. Physical Acoustics. Vol. XVIII. New York: Academic Press; 1988. p. 21-123.
5. Krishnaswamy S. Theory and applications of laser-ultrasonic techniques. En: Kundu T. Ultrasonic nondestructive evaluation: Engineering and biological material characterization. USA: CRC Press; 2004. p. 435-93.
6. Sanderson T, Ume Ch, Jarzynski J. Longitudinal wave generation in laser ultrasonics. Ultrasonics 1998; 35: 553-61.
7. Patel C, Tam A. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter. Rev Mod Phys 1981; 53(3): 517-50.
8. Tam A. Applications of photoacoustic sensing techniques. Rev Mod Phys 1986; 58(2): 381-431.
9. Monchalin J. Optical Detection of Ultrasound. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control 1986; 33 (5): 485-99.
10. Villagrán M, Zaragoza A. Photoacoustic measurement of intracavity energy in pulsed lasers. Rev Sci Instrum 1999; 70(1): 1-3.
11. Pérez R, Mejía E, Kabanzo R. Estudio y Caracterización de Transductores Basados en Cristales Piezoeléctricos y su Utilización en Espectroscopía Fotoacústica en Fase Líquida. Revista Colombiana de Física 2008; Julio; 40(2):396-8.
12. Bielecki Z, Jach K, Nowakowski M. Investigations of a laser radiation energy meter with photoacoustic converter. Opto- Electronics Review 2005; 13(3): 221-227.