

DETECTOR DE ENERGÍA DE PULSOS LASER INFRARROJO BASADO EN EL EFECTO FOTOACÚSTICO

INFRARED LASER PULSE ENERGY DETECTOR BASED ON PHOTOACOUSTIC EFFECT

Claver W. Aldama-Reyna, Jennifer D. Aldama-Guardia,
Jhenry F. Agreda-Delgado

Laboratorio de Óptica y Láseres, Departamento Académico de Física, Universidad Nacional de Trujillo, Perú.

(Recibido: 10/2017. Aceptado: 12/2017)

Resumen

Se reporta la respuesta fotoacústica de un sensor piezoeléctrico que fue irradiado con pulsos láser de longitud de onda de 1064 nm y distinta energía emitidos por un láser Nd:YAG. La medida de la energía de los pulsos láser se hizo con un medidor, marca Newport modelo 1936-R con sensor piroeléctrico y las señales fotoacústicas con un osciloscopio Tektronix, modelo DPO3054 de 500 MHz. Experimentalmente se encontró una dependencia lineal entre la intensidad de la señal fotoacústica del sensor piezoeléctrico y la energía del pulso láser. La sensibilidad de la respuesta fotoacústica del sensor fue dependiente de la placa protectora. Para placas de aluminio y aluminio pintado de negro fueron $(6.52 \pm 0.06)mV/mJ$ y $(51.2 \pm 1.5)mV/mJ$ respectivamente. Se concluyó que este tipo de sensor piezoeléctrico es muy sensible a los cambios de energía de láseres pulsados de 1064 nm, su respuesta es directamente proporcional a la energía incidente, es apropiado para mediciones de energía de láseres pulsados en tiempo real y, no se ve afectado por ruidos acústicos ni condiciones de iluminación del laboratorio.

Palabras clave: Fotoacústica pulsada, Radiación infrarroja, Sensor piezoeléctrico.

Abstract

We report the photoacoustic response of a piezoelectric sensor that was irradiated with laser pulses of wavelength of 1064 nm and different energy emitted by an Nd: YAG laser. The measurement of laser pulse energy was done with a meter, Newport model 1936-R with pyroelectric sensor and the photoacoustic signals with a Tektronix oscilloscope, model DPO3054 of 500 MHz. Experimentally, we found a linear dependence between the intensity of the photoacoustic signal of the piezoelectric sensor and the energy of the laser pulse. The sensitivity of the photoacoustic response of the sensor was dependent on the protective plate. For aluminum and aluminum plates painted black were $(6.52 \pm 0.06)mV/mJ$ and $(51.2 \pm 1.5)mV/mJ$ respectively. It was concluded that this type of piezoelectric sensor is very sensitive to the energy changes of 1064 nm pulsed lasers, its response is directly proportional to the incident energy, it is suitable for energy measurements of lasers pulsed in real time and it is not seen affected by acoustic noises or lighting conditions of the laboratory.

Keywords: Pulsed photoacoustic, Infrared radiation, Piezoelectric sensor.

Introducción

En muchas aplicaciones e investigaciones relacionadas al uso de láseres es indispensable utilizar medidores de potencia o energía de la radiación láser. En el mercado es difícil encontrar un medidor para un propósito general, que presente un rango de respuesta espectral amplio, permita medidas directas de la energía y no se vea afectado por la luz externa. Los más sofisticados son muy costosos, como los que utilizan sensores piroeléctricos. Los más sencillos están basados en efectos calorimétricos, miden la radiación láser absorbida utilizando termopilas y termocuplas [1, 2]. Otros,

basándose en el efecto fotoacústico han construido sensores de energía o potencia de láseres continuos o pulsados denominados celdas fotoacústicas cerradas y abiertas, los cuales utilizan micrófonos tipo electroreto como receptores de ondas acústicas [3–7]. Además existen otros medidores que también se basan en el efecto fotoacústico pero utilizan como detector a sensores piezoeléctricos. Algunos trabajos relacionados se describen a continuación: Peralta y colaboradores, reportan la detección piezoeléctrica del efecto fotoacústico en materiales absorbentes y utiliza como fuente un láser continuo de ion-argón con chopper y un amplificador lock in [8]. Villagrán y Zaragoza trabajaron con un láser pulsado y un transductor piezoeléctrico unido a un espejo para obtener el espectro de absorción de muestras sólidas y líquidas [9]. Bielecki y colaboradores, presentan un método de medición de energía de radiación láser usando un convertidor fotoacústico que consiste de un elemento óptico hecho de cuarzo fundido y un detector piezoeléctrico de película delgada con un preamplificador [10]. Pérez Trejos y colaboradores, presentan los resultados obtenidos en la señal fotoacústica cuando se varía la longitud de los cristales piezoeléctricos (transductores) manteniendo constante los demás factores experimentales, encontrando que cuando la longitud del cristal piezoeléctrico crece, aumenta la sensibilidad del mismo y alcanza su máximo de sensibilidad aproximadamente cuando el cristal es de 6 mm de longitud, después la sensibilidad empieza a disminuir [11]. Mallidi y Emelianov utilizaron un transductor ultrasónico y una lámina negra de polidimetilsiloxano (PDMS) para medir el perfil del haz de un láser pulsado de 532 nm y 680 nm, además de determinar la relación entre la amplitud fotoacústica y la fluencia, encontrando una relación lineal [12]. Existen numerosos trabajos que tratan el problema de la generación de ondas acústicas en un medio, originada por la absorción de la luz [13–16]. Sin embargo, para el caso en que las muestras tienen baja absorción óptica y el pulso es suficientemente corto como para despreciar la difusión térmica, el modelo fenomenológico desarrollado por Patel y Tam [13] y Tam [14] es aplicable y actual pese a su generalidad. En el caso de excitación con láseres pulsados, el pulso del láser es generalmente menor a $1\mu\text{s}$ y la distancia de propagación acústica

durante el tiempo de excitación es típicamente mucho menor que las dimensiones de la muestra. De este modo la forma del pulso es en muchos casos, independiente de las reflexiones en los contornos y la muestra puede ser tratada como de dimensión infinita. Si se emplean 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:

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

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 δ , energía de excitación E_0 y absorbancia A de la muestra.

En este trabajo definiremos como la responsividad del material a: $K\delta(1 - 10^{-A})$. En nuestro caso se consideró de interés explorar las ventajas del uso de un sensor piezoeléctrico como detector de energía de radiación láser pulsada de alta potencia, usando un arreglo simple sin la utilización de chopper ni amplificadores. Para esto se investigó la dependencia entre el voltaje de la señal obtenida con el sensor y la energía de la radiación láser incidente para la longitud de onda de 1064 nm.

Procedimiento experimental

Se estudió la respuesta fotoacústica de un sensor piezoeléctrico construido en base a una cerámica piezoeléctrica de titanato zirconato de plomo (PZT), con frecuencias de resonancia comprendidas en el rango de 17 KHz a 370 KHz con picos en 20 KHz y 220 KHz para radiación láser de 1064 nm; similar al diseñado por Patel y Tam [13]. Este sensor consta de una cerámica piezoeléctrica de forma cilíndrica (8 mm de diámetro y 3 mm de espesor) polarizada, pulida axialmente y plateado en sus extremos. La parte del sensor que hace contacto con el cilindro piezoeléctrico por su extremo interno está totalmente pulida para un mejor

contacto y transmisión de la señal acústica. La parte superior del cilindro piezoeléctrico 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 el sensor PZT y así reducir los efectos resonantes. Una delgada capa de grasa de silicona es aplicada entre el cilindro piezoeléctrico, el lado interior plano de la carcasa y el cilindro de plomo para un mejor acoplamiento. La señal acústica es transmitida mediante un resorte al punto del conector BNC. Una fotografía de las partes del sensor utilizado se muestra en la Figura 1. Al sensor piezoeléctrico se le adhirió una placa de aluminio de dimensiones 20×20 mm y espesor 1.60 ± 0.05 mm y en un segundo caso se usó una placa de aluminio pintada de color negro de dimensiones $15 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ y espesor 1.35 ± 0.05 mm, para tener una mayor absorbancia. Se decidió adherir la placa de aluminio dado que al tener un amplio rango de respuesta espectral puede soportar altas energías del láser pulsado sin ser ablacionado y es fácil de conseguir [7].



FIGURA 1. Fotografía de las partes del sensor piezoeléctrico utilizado: 1. cilindro piezoeléctrico, 2. cilindro de plomo soldado a un disco de cobre, 3. resorte, 4. conector BNC, 5. carcasa de acero inoxidable.

La Figura 2 muestra el esquema experimental utilizado para obtener la respuesta fotoacústica del sensor piezoeléctrico. La placa de aluminio adherida al sensor PZT fue irradiada por pulsos del láser Nd:YAG (Quantel tipo Brilliant) operando con su armónico principal ($\lambda=1064$ nm); la señal resultante fue adquirida por un osciloscopio digital (DPO 3054, 500 MHz, 2.5 GS/s) y los datos exportados a una computadora para su posterior análisis. Se utilizó

un fotodiodo como mecanismo de disparo del osciloscopio para que este pueda registrar las señales detectadas por el sensor PZT. Para medir la energía de los pulsos del láser incidentes sobre la placa de aluminio se utilizó un medidor de energía (Newport, 1936-R con detector piroeléctrico 818E-03-12-F); se ubicó un divisor de haz (previamente caracterizado: transmitancia y reflectancia para $\lambda=1064\text{nm}$) en el camino de la radiación láser incidente sobre la placa de aluminio adherida al SP, y se midió la energía del pulso láser reflejado por el divisor de haz que llega al detector piroeléctrico del medidor de energía y de manera indirecta se obtuvo la medida de la energía del pulso láser sobre la placa de aluminio. Para cada pulso diferente del láser se midió la señal del sensor piezoeléctrico y la energía del láser. Se obtuvo diferentes valores de energía por pulso del láser variando el tiempo de retraso del Q-switch (delay) del láser. Para el alineamiento del sensor piroeléctrico del medidor de energía se usó una cámara fotográfica digital que era enfocada hacia el lugar de incidencia de la radiación láser sobre el sensor, haciéndose visible el spot IR.

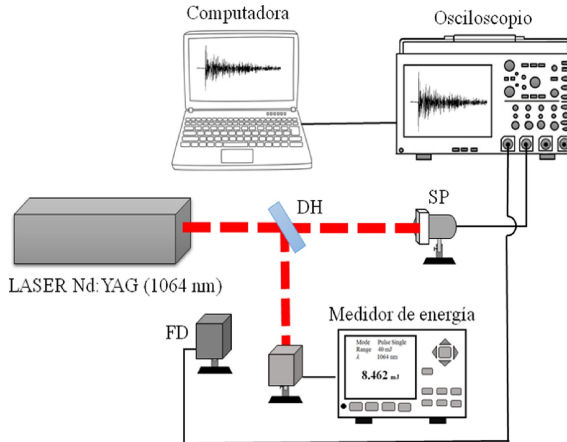


FIGURA 2. Arreglo experimental usado para la determinación de la respuesta fotoacústica del SP con placa de aluminio irradiada con pulsos láser IR. Donde; DH: divisor de haz, FD: fotodiodo, SP: sensor piezoeléctrico.

Resultados

Se reportan diversas señales fotoacústicas (voltaje vs tiempo) en oscilogramas; además gráficos del voltaje rms, voltaje pico y voltaje pico-pico de las señales fotoacústicas en función de la energía incidente sobre el sensor. De estos gráficos se obtiene a partir de la pendiente la responsividad del sensor (en mV/mJ), definida como la capacidad de respuesta fotoacústica frente a la energía del pulso láser incidente.

Para fines prácticos es más útil conocer el factor de calibración del sensor (en mJ/mV) que podemos obtener a partir de la pendiente de la curva experimental de la energía incidente sobre el sensor versus el voltaje de la señal fotoacústica (voltaje rms, voltaje pico o voltaje pico-pico). En esta investigación se ha puesto mayor atención al factor de calibración del sensor. El sensor piezoeléctrico tuvo dos variantes de estudio: en el primero el sensor fue protegido con una placa de aluminio con su color natural y en el segundo el sensor fue protegido con una placa de aluminio pintada de negro.

En la figura 3, se muestran las señales fotoacústicas para diferentes energías del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio sin pintar del sensor. Se puede apreciar un incremento en la intensidad de la señal fotoacústica conforme aumenta la energía incidente sobre la placa de aluminio adherida al sensor. Con respecto a la forma de la señal, no se observan cambios para energías menores a 28.7 mJ (régimen termoelástico), a partir de 28.7 mJ se observa una pequeña modificación en la forma de la señal (aparece un pequeño pico al inicio de la señal) lo cual es un indicio que la placa de aluminio estaría sufriendo algún cambio físico (umbral de ablación); esto es corroborado en las gráficas de la Figura 4.

En la Figura 4 se reporta la relación entre la energía del pulso láser IR incidente ($\lambda=1064$ nm) sobre la cubierta de aluminio sin pintar del sensor y la intensidad de la señal fotoacústica (voltaje rms (a), voltaje pico (b) y voltaje pico-pico (c)). En las tres gráficas se observan una dependencia lineal entre la energía y la intensidad de la señal. Los cambios en la forma de la señal mostrados en la figura 3 se pueden relacionar en las figuras 5(b) y 5(c) con los puntos

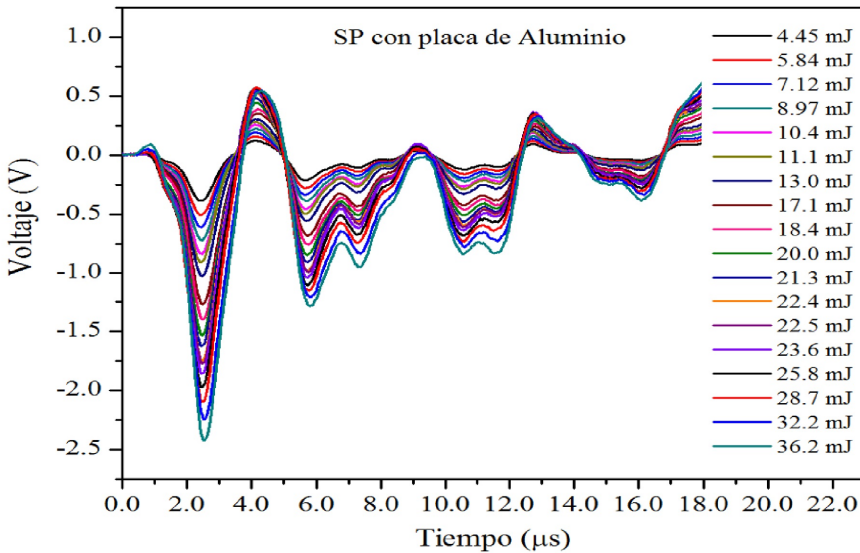


FIGURA 3. Oscilogramas, que muestran como varía la intensidad de la señal fotoacústica para cada energía del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio del SP.

para energías mayores a 28.7 mJ que están fuera de la curva de ajuste lineal. En la Figura 5(a) no se observa el cambio en el ajuste lineal, esto se debe a que el voltaje pico y voltaje pico-pico son más sensibles a cambios en la muestra, mientras que el voltaje rms analiza la señal completa, mostrando un promedio total (incluye ruido externo).

En la figura 5 se muestran las señales fotoacústicas para diferentes energías del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio pintada de negro del sensor. Se observa un incremento en la intensidad de la señal fotoacústica conforme aumenta la energía incidente sobre la placa de aluminio adherida al sensor. Además se aprecia como la forma de la señal no cambia para energías menores a 16.4 mJ (régimen termoelástico) y apartir de 16.4 mJ se observan cambios en la forma de la señal (régimen de ablación).

Como se muestra en la figura 6, los datos registrados sobrepasaron el régimen termoelástico del aluminio pintado de negro. Se observa una dependencia lineal entre la energía y la intensidad de la señal (voltaje rms (a), voltaje pico (b) y voltaje pico-pico (c)) para

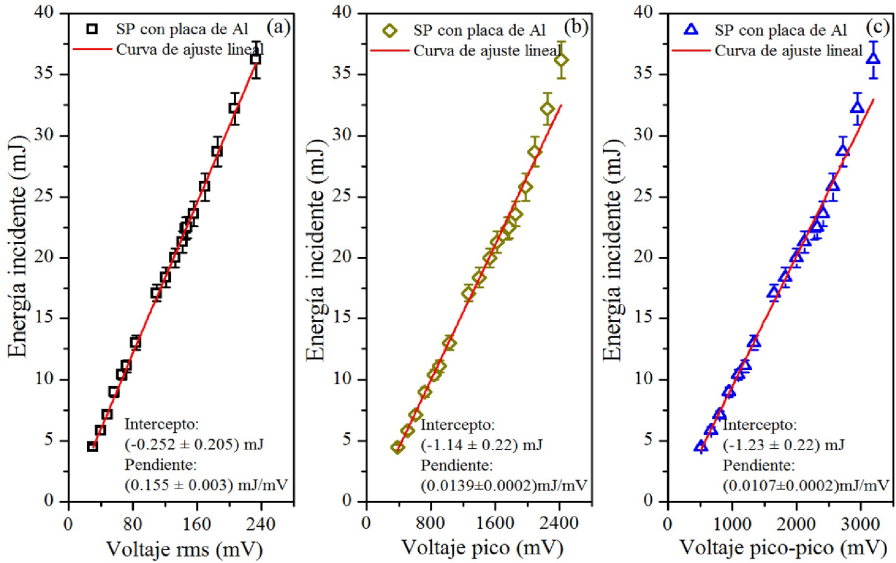


FIGURA 4. Correlación lineal entre el (a) voltaje rms, (b) voltaje pico y (c) voltaje pico-pico y la energía del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio del SP.

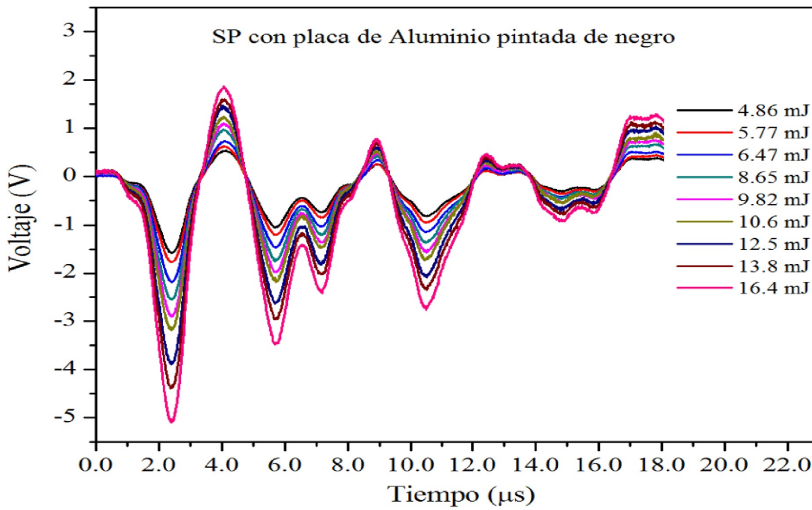


FIGURA 5. Oscilograma, que muestra como varía la intensidad de la señal fotoacústica para cada energía de pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio pintada de negro del sensor.

energías menores a 16.4 mJ. Luego crece de manera exponencial, lo cual indica que se está en el régimen de ablación de la placa de aluminio pintada de negro. El régimen de ablación de la placa de aluminio es un tema de investigación bastante amplio que esta fuera del alcance de los objetivos del presente trabajo, por lo tanto no será discutido y queda como tema abierto para futuras investigaciones.

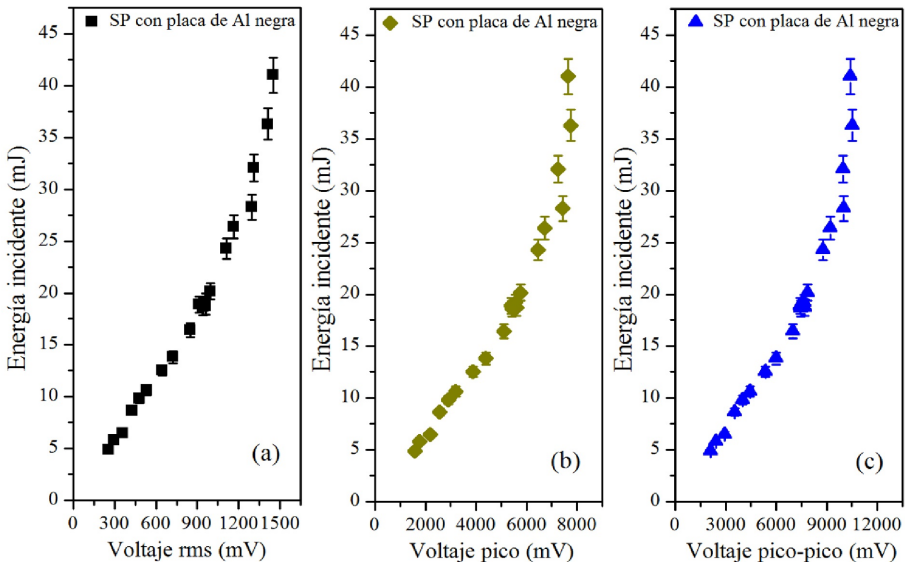


FIGURA 6. Curvas experimentales de la dependencia entre el (a) voltaje rms, (b) voltaje pico y (c) voltaje pico-pico y la energía del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio negra del SP.

La figura 7 muestra la dependencia lineal entre la energía del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio pintada de negro del sensor y la intensidad de la señal (régimen termoelástico de la figura 6), lo cual concuerda con lo indicado en la ecuación 2. De los resultados de estas gráficas se observa que las curvas de ajuste lineal están levemente desplazadas del origen, las cuales se encuentran dentro del margen de error experimental y, con respecto a las pendientes, la figura 7(a) (energía incidente vs voltaje rms) presenta mayor pendiente que las otras dos graficas. Esto también se observó en el caso del sensor cubierto con la placa de aluminio sin pintar (Figura 4).

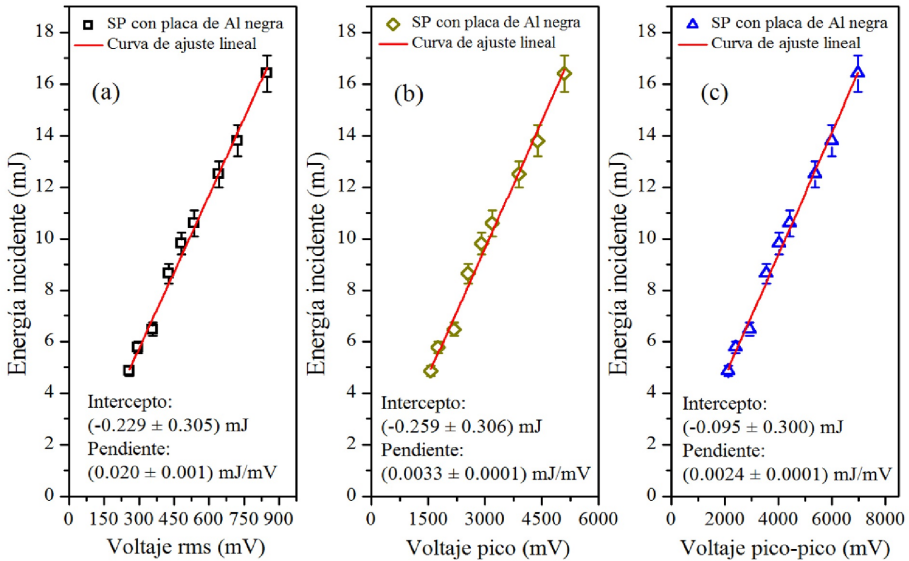


FIGURA 7. Correlación lineal entre el (a) voltaje rms, (b) voltaje pico y (c) voltaje pico-pico y la energía del pulso láser IR incidente sobre la cubierta de aluminio pintada de negro del SP, correspondiente al régimen termoelástico.

En la figura 8 se observa la superposición de las curvas experimentales de la 4 y 7, en donde a una energía determinada la curva del SP con placa de aluminio tiene una intensidad de señal menor que la del SP con placa de aluminio pintada de negro, debido a que la placa de aluminio pintada de negro tiene una absorbancia mayor que la placa de aluminio sin pintar. Esto concuerda con lo reportado en la ecuación 2, que indica que a una energía determinada cuanto mayor sea la absorbancia del material mayor será el voltaje de la señal fotoacústica. De estas curvas también se observa que el umbral de ablación de la placa de aluminio (28.7 mJ) es mayor que el de la placa de aluminio pintada de negro (16.4 mJ). De lo anterior se deduce que para energías IR menores a 16.4 mJ es mejor trabajar con el SP cubierto con la placa de aluminio pintada de negro puesto que se tiene una mayor sensibilidad (responsividad) a los cambios de energía, lo cual se manifiesta en la pendiente de cada gráfica, así por ejemplo para obtener un V_{rms} de 1 mV con la cubierta de aluminio sin pintar

se requiere $155 \mu\text{J}$ y con la cubierta de aluminio pintada de negro se requiere sólo $20 \mu\text{J}$.

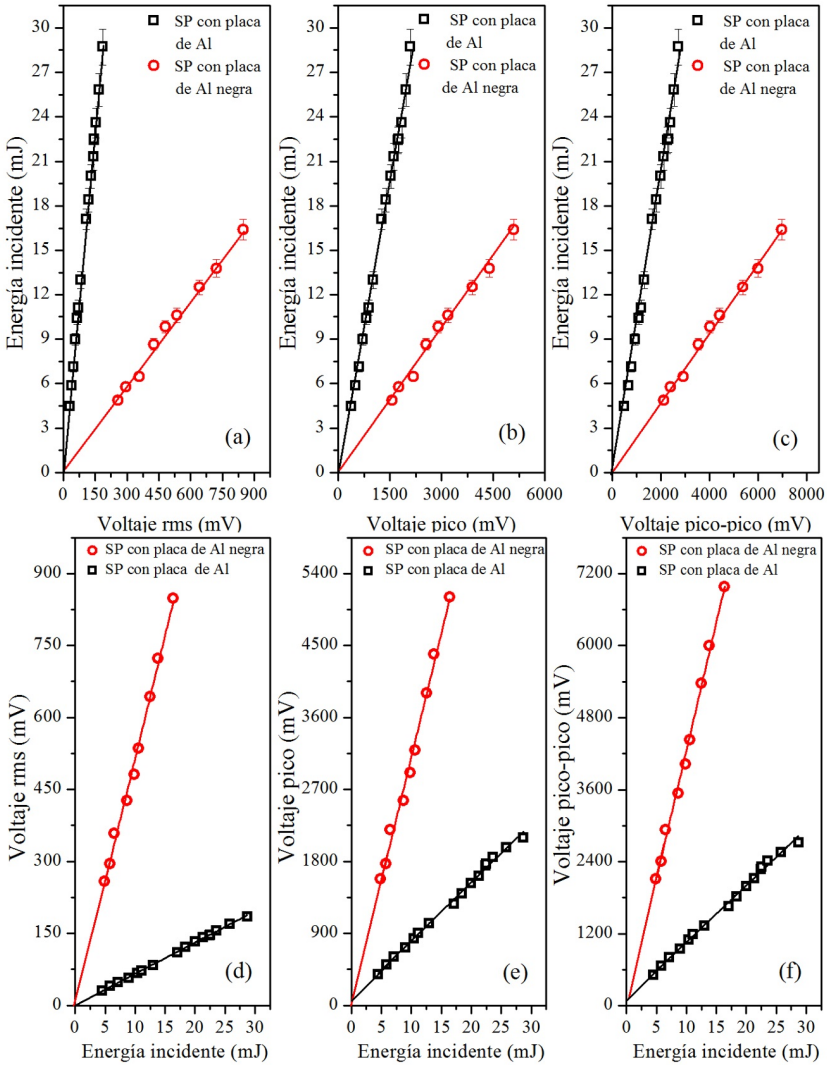


FIGURA 8. Curvas experimentales de la energía de la radiación láser pulsada de 1064 nm incidente sobre el SP versus (a) voltaje rms, (b) voltaje pico, (c) voltaje pico-pico de las señal fotoacústicas del SP. En (d), (e) y (f) se tienen las graficas (a), (b) y (c) respectivamente con los ejes invertidos, es decir voltaje rms, voltaje pico y voltaje pico-pico versus energía.

Longitud de onda de la radiación láser incidente:		1064 nm	
Cubierta del sensor:		Al	Al-negro
Responsividad (mV/mJ)	Vrms vs E	6.52±0.06	51.2±1.5
	Vp vs E	72.9±1.2	309±11
	Vpp vs E	94.4±1.6	427±11
Intercepto (mV)	Vrms vs E	0.70±0.99	1.80±15.87
	Vp vs E	78.4±21.8	19.9±112.6
	Vpp vs E	113±29	-12.8±118.0
Coeficiente de correlación lineal	Vrms vs E	0.999	0.993
	Vp vs E	0.996	0.990
	Vpp vs E	0.996	0.994
Rango de energía incidente (mJ)		4.45-28.7	4.86-16.4
Régimen termoelástico:			

TABLA 1. Cuadro resumen de los principales resultados experimentales obtenidos de las gráficas de la intensidad de la señal fotoacústica en función de la energía del pulso láser incidente sobre el SP cubierto con aluminio sin pintar y aluminio pintado de negro para la longitud de onda de 1064 nm. (Responsividad)

Longitud de onda de la radiación láser incidente:		1064 nm	
Cubierta del sensor:		Al	Al-negro
Factor de calibración (mJ/mV)	E vs Vrms	0.155±0.003	0.020±0.001
	E vs Vp	0.0139±0.0002	0.0033±0.0001
	E vs Vpp	0.0107±0.0002	0.0024±0.0001
Intercepto (mJ)	E vs Vrms	-0.252±0.205	0.229±0.305
	E vs Vp	-1.14±0.22	-0.259±0.306
	E vs Vpp	1.23±0.22	-0.095±0.300
Coeficiente de correlación lineal	E vs Vrms	0.999	0.990
	E vs Vp	0.995	0.986
	E vs Vpp	0.995	0.992
Rango de energía incidente (mJ)		4.45-28.7	4.86-16.4
Régimen termoelástico:			

TABLA 2. Cuadro resumen de los principales resultados experimentales obtenidos de las gráficas de la energía del pulso láser en función de la intensidad de la señal fotoacústica para cada cubierta del sensor piezoeléctrico utilizado. (Factor de calibración)

En las Tablas 1 y 2 se presentan los parámetros obtenidos de las curvas experimentales reportadas (responsividad y factor de calibración) para el sensor piezoeléctrico con la cubierta de aluminio sin pintar y con la cubierta de aluminio pintada de negro, que fueron irradiadas con pulsos láser de longitud de onda de 1064 nm a diferentes energías.

De las pendientes de las gráficas de voltaje versus energía se obtienen las responsividades en mV/mJ y de las pendientes de las gráficas de energía versus voltaje se obtienen los factores de calibración en mJ/mV . Teóricamente si la entrada de la energía láser es cero no debería generarse ninguna señal fotoacústica por lo tanto es de esperarse un voltaje cero, sin embargo extrapolando las curvas experimentales (líneas rectas) no pasan exactamente por el origen de coordenadas sino que tienen un ligero desplazamiento. Estos valores de intercepto distintos de cero son debido al ruido eléctrico inherente al receptor electrónico y sistema de adquisición de datos [12].

En el régimen termoelástico del material irradiado que cubre al sensor piezoeléctrico todas las curvas experimentales presentan una relación lineal; esto se deduce por los altos coeficientes de correlación lineal obtenidos, comprendidos entre 0.986 y 0.999. Los más altos coeficientes de correlación lineal corresponden a las gráficas de voltaje rms versus energía o viceversa y están comprendidos entre 0.990 y 0.999. Cuando la energía del pulso láser está por encima del umbral de ablación del material irradiado entonces se pasa al régimen de ablación y la dependencia entre voltaje rms y energía ya no es lineal, además esto causa modificaciones físicas en la cubierta del sensor y ello conduciría a un deterioro del sensor. Para medidas más exactas de la energía usando el factor de calibración hay que usar un factor de corrección que corresponde al intercepto con el eje vertical de las gráficas de energía versus voltaje rms.

Las intensidades de las señales fotoacústicas obtenidas son lo suficientemente grandes como para ser detectadas por el osciloscopio y por lo tanto no se requiere de amplificadores de señales, con la consiguiente ventaja de reducir al mínimo los componentes del sistema de medición de energía. Otra de las

grandes ventajas de este tipo de sensor es que no se ve afectado por algún ruido acústico o iluminación del ambiente de trabajo puesto que la respuesta del sensor es a los pulsos láser y son estos los que generan la señal fotoacústica. La mayor dificultad para una reproducibilidad de las mediciones con este tipo de sensor es un buen alineamiento entre la radiación incidente y el eje del sensor lo cual requiere de personal con un buen entrenamiento en el manejo de esta técnica. Por otro lado respecto al uso de la placa de aluminio como cubierta del sensor los resultados demuestran que es una alternativa aceptable lo cual coincide con la propuesta de Huang y colaboradores [7] quienes afirman que hay tres ventajas para escoger el aluminio como material absorbente: i) las características metálicas proveen un amplio rango de respuesta espectral, ii) no debería ser dañado por pulsos láser de alta energía y iii) la placa de aluminio es fácil de adquirir y muy barata. En cuanto al espesor de la cubierta de aluminio no es crítica puesto que al estar en contacto con el sensor las señales ultrasónicas viajan en la dirección de la radiación incidente y tan solo influiría en el tiempo de arribo de la señal al PZT siendo un parámetro que se incluye en la constante de calibración del detector. Los resultados también demuestran que al pintar de negro a la placa de aluminio la responsabilidad del sensor aumenta por un factor mayor a 4 lo cual facilita la medida del voltaje y el tipo de pintura negra usada debería ser aquella que resista a las condiciones ambientales y no se deteriore con el uso.

Conclusiones

La dependencia entre el voltaje rms (también voltaje pico y voltaje pico pico) de la señal fotoacústica generada en el sensor piezoeléctrico y la energía del pulso láser para una longitud de onda 1064 nm es una función lineal en el rango de energías menores al umbral de ablación del material que cubre al sensor (régimen termoelástico). Esta dependencia lineal es consistente con la teoría de Tam. La magnitud de los valores de las amplitudes de las señales fotoacústicas obtenidas con el sensor piezoeléctrico son lo suficientemente grandes como para ser detectados por un osciloscopio, aun para energías de pulsos láser del orden de μJ , 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. El tipo de sensor piezoeléctrico 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.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con fondos provenientes del Canon Minero -Región La Libertad-Perú mediante el Proyecto código PIC N° 11-2014 de la Universidad Nacional de Trujillo-Perú. Los autores agradecen a la Dra. Elsi Mejía Uriarte del CCADET-UNAM-México por haber proporcionado el sensor piezoeléctrico usado en esta investigación.

Referencias

- [1] R. Swanepoel, *J. Phys. E* **17**, 896 (1984).
- [2] B. B. Radak and B. B. Radak, *Rev. Sci. Instrum.* **62**, 318 (1991).
- [3] M. K. Satheeshkumar and C. P. G. Vallabhan, *J. Phys. E* **18**, 434 (1985).
- [4] V. N. Rai, S. N. Thakur, and D. K. Rai, *J. Phys. E* **20**, 1472 (1987).
- [5] M. D. da Silva, I. N. Bandeira, and L. C. M. Miranda, *J. Phys. E* **20**, 1476 (1987).
- [6] M. Duarte and M. Vieira, *Opt. Laser Eng.* **28**, 481 (1997).
- [7] X.-C. Huang, X.-Z. Guo, and Y.-X. Weng, *Rev. Sci. Instrum.* **82**, 046103 (2011).
- [8] S. B. Perelta, H. H. Al-Khafaji, and A. W. Williams, *J. Phys. E* **21**, 195 (1988).
- [9] M. Villagrán-Muniz and A. Zaragoza-Lemus, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 1 (1999).

-
- [10] Z. Bielecki, K. Jach, and M. Nowakowski, *Opto-Electron. Rev.* **13**, 221 (2005).
 - [11] R. Pérez-Trejos, E. Mejía-Ospino, and R. Cabanzo-Hernández, *Rev. Colomb. Fis.* **40**, 396 (2008).
 - [12] S. Mallidi and S. Emelianov, *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 054901 (2009).
 - [13] C. K. N. Patel and A. C. Tam, *Rev. Mod. Phys.* **53**, 517 (1981).
 - [14] A. C. Tam, *Rev. Mod. Phys.* **58**, 381 (1986).
 - [15] H. M. Lai and K. Young, *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 2000 (1982).
 - [16] J.-M. Heritier, *Opt. Commun.* **44**, 267 (1983).