

Acelerómetro Mediante el Efecto Foto-FEM

Carlos M. García Lara,^a Rubén A. Vázquez Sánchez,^a Sergio Mendoza Vázquez,^b Jorge Camas Anzueto^c

^a Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Libramiento Norte Poniente S/N, Col. Lajas Maciel, 29000, Chiapas, México.
carlosmgl10@yahoo.com.mx

^b Universidad Autónoma de Chiapas
km 1081 Boulevard Belisario Domínguez, Colina Universitaria, 29029, Chiapas, México.

^c Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
km 1080 Carretera Panamericana, 29000, Chiapas, México.

RESUMEN

Dos patrones de interferencia modulados en fase incidiendo sobre una muestra semiconductor de pozos cuánticos de InGaAs crean dos señales de foto-FEM. El patrón interfiere constructivamente solo cuando la frecuencia de modulación de ambos patrones es aproximadamente igual a la amplitud de la modulación de fase, obteniéndose un pico en la señal de salida que corresponde a la frecuencia de vibración y la amplitud del pico observado es equivalente a la magnitud de la vibración. Se observa un uso potencial en la determinación de frecuencias y amplitud de vibración de objetos utilizando técnica de no contacto.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de vibraciones es utilizada en instrumentación para detectar defectos en máquinas rotativas, como fenómenos de cavitación que pulsan a frecuencias características. El costo de mantenimiento y reparación son los factores más importantes de cualquier sistema de operación técnico. Su minimización, cuando el sistema está operando es prácticamente imposible sin un sistema de monitoreo. Para lograrlo es necesario el uso de sistemas acoplados (como transductores que convierten energía de una forma a otra) directamente al objeto de prueba de manera que la vibración sea detectada.

Sin embargo, existen casos en donde es necesario que no exista contacto físico o la medida sea remota. Existen diferentes arreglos en donde se utilizan técnicas de no contacto, los transductores acústicos electromagnéticos (EMATS) [1], pero este tipo de elementos requiere que la muestra sea o contenga una capa conductora; los capacitivos [2], pero requieren de una superficie pulida por lo que son utilizados fundamentalmente en laboratorio. Debido a lo anterior estos sistemas resuelven en parte la necesidad de no contacto, pero existen ambientes hostiles, superficies rugosas, etc. en los cuales no pueden ser empleados.

Existen técnicas que emplean foto-detectores como transductores, una de éstas es el efecto Doppler utilizado para medir vibraciones de alta frecuencia,

pero no puede ser usado para la medición de vibraciones o desplazamientos de baja frecuencia [3]. Otra técnica es la que emplea ultrasonido, basado en cambios de fase, usada para la medición de desplazamientos de superficie en rangos de vibración del orden de nanómetros.

Las técnicas ópticas interferométricas, detectan desplazamientos típicos de la superficie de alrededor de 1 nm a 10 nm, frecuencia de operación de hasta 10 MHz, objetos con superficies rugosas, en movimiento y, dentro de ambientes hostiles, etc, pero presentan inconvenientes, debido a las características propias de los interferómetros [4]. El interferómetro de Michelson es muy sensible a variaciones de temperatura y a vibraciones mecánicas [5]. Además, de que la relación entre la vibración y la señal proporcionada por un fotodiodo es no lineal, lo que hace necesario un ajuste para que la proporción sea lineal. Otro problema, es que en ambientes industriales se tienen frentes de onda no uniformes (*speckle*) [6], lo cual hace más complicado el sistema óptico, además de provocar una disminución de la razón señal-ruído (SNR).

Una alternativa es emplear sistemas interferométricos adaptivos [7], que solucionan los problemas de ajuste, corrimientos de fase lentos y el uso de frentes de onda deformados. Existen tres diferentes arreglos, utilizando mezcla de cuatro ondas, mezcla de dos ondas, pero debido al uso de cristales fotorrefractivos en los arreglos anteriores se tiene la limitante de que el tiempo de grabado de

hologramas dinámicos es grande (≈ 0.1 ms), por lo que son poco eficientes a frecuencias de vibración rápidas. El efecto de fuerza foto-electro-motriz (fuerza FEM) [7], utiliza una muestra fotoconductor como foto-detector adaptivo [8]. Este tipo de arreglo puede detectar movimientos rápidos del patrón de interferencia (aún *speckle*). Formalmente, los primeros experimentos en detección adaptiva de vibraciones mecánicas del orden de picómetros utilizando un detector de fuerza FEM de GaAs fueron reportados por Stepanov [9]. La modulación en fase del haz de prueba fue asegurada por medio de la vibración de uno de los espejos de un interferómetro en la configuración experimental. Desde un punto de vista práctico, los experimentos en detección adaptiva de vibraciones reales mecánicas de superficies rugosas son por supuesto de mucha mayor importancia. Resultados obtenidos usando detectores de fuerza FEM de GaAs a una longitud de onda de 632,8 nm con un láser de He-Ne [10], donde los modos de vibración de un piezo-eléctrico cubierto por una superficie rugosa fueron analizados para un alcance en frecuencias de 1 kHz a 50 kHz.

Los sistemas tratados anteriormente han sido ampliamente investigados en años recientes, debido a los factores relacionados en la detección de daños estructurales y al gran impacto que tienen en cuanto a seguridad en diferentes áreas, particularmente en la industria (aeronáutica, automotriz, etc.) [11]. Además de que la técnica debe ser no destructiva, fácil de usar, suficientemente rápida para ser supervisada en tiempo real y con una reducida incertidumbre en la respuesta, la cual debe ser clara y de fácil interpretación [12].

En este trabajo se propone y demuestra una técnica nueva de no contacto basada en el efecto fuerza FEM para la medición de la vibración de objetos, conociendo la masa y frecuencia del objeto vibrando. La técnica se basa en una doble modulación de los haces que interfieren. Uno de estos se modula a una frecuencia de referencia y el otro se envía hacia el objeto vibrante. A continuación se hacen interferir en un foto-detector, produciendo cada uno su propia señal de fuerza FEM. Cuando ambos haces oscilan a diferentes frecuencias, se produce batimiento entre las señales. Cuando las frecuencias son iguales (referencia-objeto), el batimiento desaparece y de esta manera se determina la frecuencia de vibración del objeto, la magnitud del pico es proporcional a la amplitud de vibración.

2. TEORIA Y ARREGLO EXPERIMENTAL

Sobre una muestra fotoconductor, incide un patrón de interferencia (el cual consiste de franjas brillantes y oscuras) oscilando a una frecuencia, Ω , dando como resultado una corriente alterna a través de la muestra, cuya frecuencia de oscilación es igual a la frecuencia Ω de modulación [7]. La corriente presente en la muestra debido al efecto de fuerza FEM proporcional al desplazamiento del patrón de interferencia [13], y está dado por:

$$J^t = 2A\Delta \text{sen}(\Omega_{ref} \cdot t + \Phi) \cos(\delta\Omega \cdot t), \quad (1)$$

donde A es una constante debida a diferentes parámetros involucrados en el efecto de fuerza FEM, Δ es la amplitud de modulación, Ω_{ref} es la frecuencia de referencia y, $\delta\Omega$, es la diferencia entre dos frecuencias de modulación [14], Φ determina si los patrones están o no en fase. En caso de estar fuera de fase, la corriente producida será muy pequeña. El sistema propuesto funciona únicamente para amplitudes de fase pequeñas [15].

La función de transferencia de la foto-corriente generada por el efecto de fuerza FEM, hace que los foto-detectores basados en este efecto por si solos eliminen los efectos de fluctuaciones de baja frecuencia, además del hecho de que dependen de la formación de una distribución de carga espacial dentro del detector, a estos detectores se les conoce como foto-detectores adaptivos. Otra característica importante, es que la señal de fuerza FEM es proporcional a la amplitud de las oscilaciones o cambios de fase ($J^t \propto \Delta$), en el régimen de respuesta lineal. Para grandes amplitudes y altas frecuencias de oscilación es necesario sustituir Δ en la Ec. (1) de fuerza FEM por el factor $J_0(\Delta)J_1(\Delta)$, que son funciones Bessel del orden correspondiente.

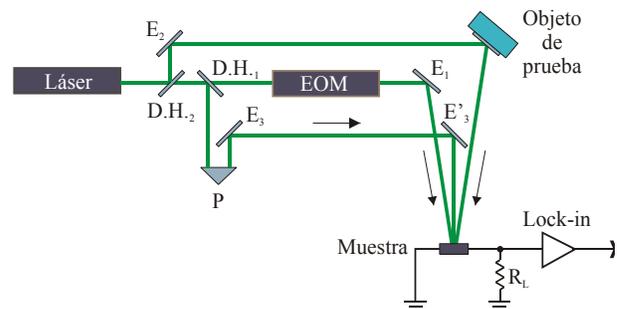


Fig. 1. Esquema del arreglo experimental utilizado en la detección de frecuencias de vibración de objetos

En la Fig. 1, se presenta el esquema del arreglo experimental utilizado en la detección de vibraciones, donde se observan dos arreglos interferométricos, siendo este sistema muy similar al presentado en [16].

El arreglo interferométrico está formado por un divisor de haz D.H₁, que divide el haz del láser en dos partes, uno de estos haces (haz de búsqueda) pasa por el modulador electro-óptico (EOM), reflejándose en el espejo E₁ y finalmente incide en la muestra. El otro haz dividido (haz de referencia) se refleja en un prisma, P (utilizado para compensar caminos ópticos), después se refleja en los espejos E₃ y E₃' y termina en la muestra. Este interferómetro es el que realizará la función de búsqueda de la frecuencia desconocida de oscilación del objeto de prueba.

p+ GaAs	200nm
p Al _{0.3} Ga _{0.7} As	300nm
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	500nm
Pozos cuánticos múltiples	
60 periodos	
7nm In _{0.15} Ga _{0.75} As	
6nm GaAs [30%]	
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	500nm
n Al _{0.3} Ga _{0.7} As	300nm
n GaAs	Sustrato

Fig. 2. Estructura interna del pozo cuántico múltiple A598 wITO, con capas LTG de GaAs/AlGaAs con 30% de aluminio

El láser utilizado es de He-Ne de 632,8 nm de longitud de onda y la estructura semiconductor de pozos cuánticos múltiples empleada consiste de la secuencia de capas de arsenuro de galio (GaAs) alternadas con barreras de arsenuro de galio con pequeñas cantidades de indio (In_{0.15}Ga_{0.75}As). Las capas poseen un espesor que va de 6 nm a 7 nm. La geometría empleada es de configuración longitudinal. La muestra denominada como A598 wITO fue crecida a temperaturas que van desde los 300°C hasta los 580°C con un dopaje de silicio (Si) de 2x10¹⁸ cm⁻³ para n; berilio (Be), de 2x10¹⁸ cm⁻³ para p; y berilio de 1x10¹⁹ cm⁻³ para p+. Las capas LTG (*Low Temperature Growth*) poseen una alta resistividad. Estas capas de recubrimiento fueron fabricadas con capas de GaAs y Al_{0.3}Ga_{0.7}As de 300 nm cada una, como se muestra en la Fig. 2. La

película resultante fue depositada en un portaobjetos. En las capas externas se colocaron electrodos unidos a conectores del tipo BNC mediante soldadura de plata. La resistencia inicial de la muestra sin haz láser incidente fue de aproximadamente 8,5 MΩ.

La amplitud de modulación en fase mínima que la muestra de InGaAs puede detectar (para una Δ_{máx} = 1 radián), tomando el producto ħω = 1.9737x10⁻¹⁸ Joules para una λ=632.8 nm, a una potencia incidente P₀=3.0 mW; y, el cambio en frecuencia Δf = 1 Hz, es de Δ_{min} ≈ 3.6x10⁻⁸ radianes, que corresponden a un desplazamiento mínimo de δ_{min} ≈ 1 800 pm.

3. RESULTADOS

Si realizamos un barrido a diferentes amplitudes de vibración, utilizando el arreglo presentado en la Fig. 1, utilizando un modulador electro-óptico (EOM), para la búsqueda de la amplitud de vibración del objeto desconocida y otro modulador electro-óptico para simular la frecuencia de vibración o de prueba; obtenemos la gráfica mostrada en la Fig. 3.

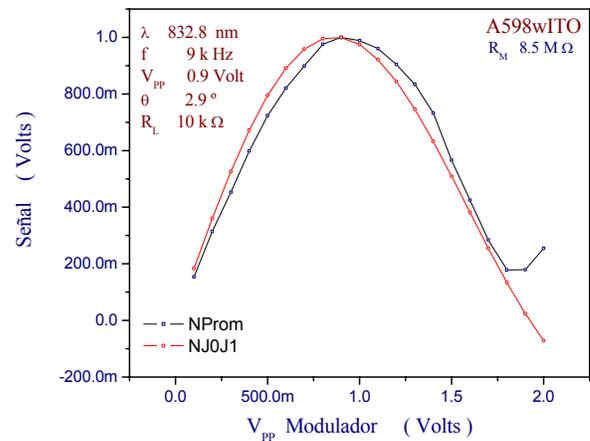


Fig. 3. Gráfica obtenida utilizando un modulador electro-óptico como objeto de prueba (EOM_p) y otro como búsqueda (EOM_b), para determinar la amplitud de la vibración.

De la Fig. 3, se observa que la señal de fuerza FEM para ambos moduladores EOM_b (muestreo) y EOM_p (prueba), es de una amplitud similar el factor J₀(Δ)J₁(Δ), obtenida a una frecuencia de 9 kHz. El sistema presenta las ventajas de bajo costo del láser, además de que la muestra empleada proporciona amplitudes de un orden de magnitud mayor, posee ventajas como mayor sensibilidad y

menor costo, comparado a la muestra de BSO presentada en un trabajo previo [13].

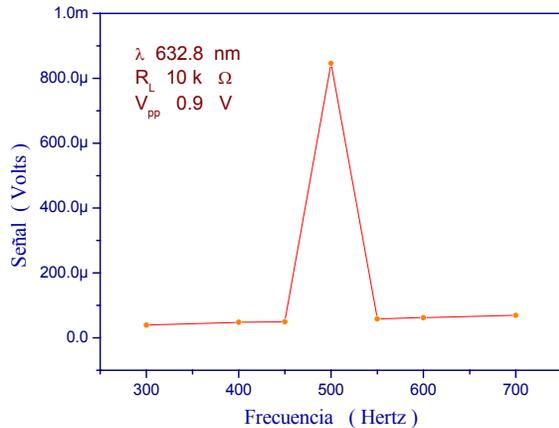


Fig. 4. Gráfica obtenida utilizando un modulador electro-óptico como objeto de búsqueda (EOM_p) y una bocina a una frecuencia fija de 500 Hz.

La Fig. 4, presenta el pico de sintonización obtenido cuando utilizamos simultáneamente los dos arreglos interferométricos. De la Fig. 4, se puede observar claramente un pico en la señal a 500 Hz. La curva se obtuvo fijando la frecuencia de modulación del modulador electro-óptico a 500 Hz y haciendo un barrido en frecuencia con una bocina desde 300 hasta 700 Hz. Cuando la frecuencia de oscilación del modulador electro-óptico se acerca al valor de la frecuencia de modulación de la bocina, la señal empieza a crecer llegando a su máximo valor cuando ambas frecuencias son iguales. Finalmente cuando la frecuencia del modulador se aleja, la señal comienza a decrecer, lo cual corresponde al batimiento de las señales de fuerza FEM.

4. DISCUSIÓN

Esta técnica, puede ser utilizada como foto-detector de señales moduladas en fase [17], para la medición de bajas amplitudes de vibración de objetos [13], detección de ondas de ultrasonido incidiendo en placas con dispersión difusa [18]. Otras aplicaciones como amarre de fase óptica en la operación de láseres [19], análisis de espectros ópticos [20], detección de absorción óptica [21], etc.

Por otro lado se hace necesario el trabajo para determinar la resolución de ésta técnica propuesta en este trabajo, la cual se realizara empleando materiales de espesores conocidos y observando

los cambios en la amplitud de la señal, los cuales deberán estar correlacionados.

5. CONCLUSIONES

Demostramos una nueva técnica óptica de no contacto basada en el efecto de fuerza foto-electromotriz para la detección de vibraciones de objetos. El método propuesto es adecuado tanto para el caso de frentes de onda planos, como frentes de onda irregulares. El caso estudiado fue el de frentes de onda planos, los cuales eran modulados en fase. Cuando la frecuencia del modulador electro-óptico se amarra a la frecuencia del objeto, la frecuencia de oscilación del objeto es determinada. El ancho de banda de detección está determinado por el tiempo de integración del amplificador, el cual puede ser tan pequeño como 0.01 Hz, el sistema permite medir con gran exactitud la frecuencia de oscilación de objetos, por lo que se considera una herramienta a tomar en cuenta en la determinación de dicho parámetro. El sistema puede utilizarse para la medición de amplitudes y frecuencias, dependiendo del tipo de foto-detector usado, para bajas frecuencias se utilizarían polímeros fotoconductores cuyo tiempo de respuesta corresponde a unos cuantos mHz mientras que para frecuencias altas podría utilizarse semiconductores basados en GaAs, cuya respuesta se extiende a MHz.

REFERENCIAS

- [1] SCRUBY C. B. (1990), Laser Ultrasonics Techniques Applications, Hilguer Bristol, L. E. Drain
- [2] KOCIS Stefan (1996), Ultrasonic Measurements and Technologies, Ed. By Chapman & Hall, Zdenko Figura
- [3] HUANG S-R.(1992), Doppler effect, J. Acous. Soc. Am., Vol. 91, 2, pp 965-974
- [4] SALEH B.E.A. (1991), Fundamentals of photonics, Ed. John Wiley & Sons, Inc., M.C. Teich
- [5] HECHT Eugene (2000), Optica, Ed. Addison Wesley, p. 408
- [6] DEWHURST R. J. (1999), Q. Shan, Optical remote measurement of ultrasound, Meas. Sci. Technol. 10, R139-R168
- [7] STEPANOV S. (2000), Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices, Vol. 2, Ed. H. Nalwa, p. 205
- [8] MITCHELL P. V. (1995), et al. Tech. Digest of Photorefractive Materials, Effects and Applications Conf. (Aspen, Lodge,), p. 432.

- [9] STEPANOV S. I. (1990), I. A. Sokolov, G. S. Trofimov, V. I. Vlad, D. Popa and I. Apostol, *Opt. Lett.*, 15, 1239
- [10] GLASS A. M. (1990), D. D. Nolte, D. H. Olson, G. E. Doran, D. S. Chemla, and W. H. Knox, Resonant photodiffractive four wave mixing in semi-insulating GaAs/AlGaAs quantum wells, *Opt. Lett.*, Vol. 13, 264-266
- [11] CASTELLINI P. (2003), G. M. Revel, *Damage Detection by Laser Vibration Measurement*, Roma, 1000
- [12] SOKOLOV Igor A. (1998), *Adaptive Photodetectors for Vibration Monitoring*, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, p. 791-795
- [13] GARCÍA LARA Carlos Manuel (2003), Rubén Ramos García, Medición de frecuencias de vibración de objetos utilizando el efecto de fuerza FEM, *Superficies y Vacío*, Vol. 16, No 2, 29-33
- [14] KASAP Safa (1999), *Group Index vs. Wavelength Properties of Glasses*, Solved Problems in Optoelectronics, University of Saskatchewan, Canada
- [15] DLUGASZEK A. (1999), J. Jabczynski, J. Janucki, W. Skrzeczanowski, Optoelectronic sensor of longitudinal and angular displacements, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, Vol. 2, No 3, 71-73
- [16] MARSHALL R. H. (1996), I. A. Sokolov, Y. N. Ning, A. W. Palmer and K. T. V. Grattan, Photo-electromotive force crystals for interferometric measurement of vibrational response, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, 1683-1686
- [17] RODRÍGUEZ P. (1997), N. Korneev and S. I. Stepanov, Detection of photothermal surface displacement with adaptive photodetectors, *Proceedings CLEO*, p 563
- [18] PETROV M. P. (1990), I. A. Sokolov. S. I. Stepanov, and G. S. Trofimov, Non-steady state photo-electromotive-force induced by dynamic gratings in partially compensated photoconductors, *J. App. Phys.*, Vol 68, 2216
- [19] MITCHELL P. V. (1996), S. W. McCahon, M. B. Klein, T. R. O'Meara, G. J. Dunning and D. M. Pepper, High-bandwidth self-compensating laser-based ultrasound detector using photoinduced EMF in GaAs, *Topical meeting of Photorefractive materials, effects and devices*, 432-434, OSA
- [20] DAVIDSON F. (1994), C. C: Wang and S. Trivedi, Optical phase-lock loops with photoconductive semiconductor phase detector, *Opt. Lett.*, Vol. 19, 774-776
- [21] WANG C. C. (1996), and F. Davidson, Optical spectra analysis using moving space-charge fields in photoconductive semiconductor, *JOSA B*, 1376-1383