

Profundímetro láser para monitoreo de inmersión con equipo de buceo scuba con nanopartículas

C. Torres-Torres^{1*}

S. Morales-Bonilla¹

J. Muñoz-César¹

M. Trejo-Valdez²

G. Urriolagoitia-Sosa¹

G. Urriolagoitia-Calderón¹

¹Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista,
CP 07738, México DF.
MÉXICO.

²Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas,
Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista,
CP 07738, México DF.
MÉXICO.

Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54686
Correo electrónico cctorrest@ipn.mx

Recibido el 10 de junio de 2009; aceptado el 26 de enero de 2010.

1. Resumen

Se reporta un estudio de la aplicación de las propiedades ópticas y mecánicas de una muestra de nanopartículas de oro embebidas en dióxido de titanio para el desarrollo de un interferómetro óptico. Se utilizó un láser de estado sólido con longitud de onda de 670 nm y 5 mW de potencia promedio para detectar a través de una técnica interferométrica la presión absoluta inducida sobre la muestra. Se presentan resultados numéricos y experimentales realizados a una profundidad de hasta 20 metros bajo el nivel mar. Las mediciones fueron efectuadas cuando el sistema sensor funciona como un interferómetro Fabry-Perot y es montado como parte del equipo de regulación de aire comprimido para buceo marino.

Palabras clave: interferometría, nanoestructuras, sensores.

2. Abstract (Laser Deepmeter for Scuba Diving)

The optical and mechanical properties of Gold nanoparticles embedded in a Titanium dioxide film were investigated for developing an optical interferometer. An interferometric technique with a solid state laser with 670 nm wavelength and 5 mW average power was used in order to measure the absolute pressure induced on the sample. Numerical and experimental results are shown for conditions at 20 m depth under the sea level. The measurements were performed when the sensor system behaves like a Fabry-Perot interferometer as a part of conventional equipment for scuba diving.

Key words: interferometry, nanostructures, sensors.

3. Introducción

La asombrosa velocidad y magnitud de las interacciones físicas originadas en nanomateriales ha generado numerosas investigaciones en los últimos años [1]. Nanoestructuras de diferentes tipos han probado ser poderosas herramientas en extraordinarias aplicaciones que son fascinantes en áreas como la medicina [2] y la fotónica [3]. El comportamiento de las nanopartículas parece ser fuertemente dependiente de su estructura [4], de su tamaño [5], de su orientación [6], de su distribución en un medio [7], del ambiente que les contiene [8], y más aún, de la intensidad del efecto que les estimula [9]. Recientemente han sido implementadas diversas técnicas completamente ópticas que prometen crear sistemas altamente sensibles basados en arreglos de materiales nanoestructurados [10]. Ya ha sido señalado que a través de la combinación de distintos efectos puede alcanzarse un incremento significativo de las propiedades ópticas de nanopartículas embebidas en dióxido de silicio [11] y nitruro de silicio [12]; sin embargo, las propiedades ópticas ultrarápidas de nanopartículas embebidas en dióxido de titanio pueden verse especialmente favorecidas dado el alto índice de refracción que presenta este compuesto [13-16]. Bajo estos términos y con el objetivo de proponer un sistema de

detección de perturbaciones físicas causadas por esfuerzos mecánicos, en este trabajo se estudia la modificación de las propiedades ópticas de una muestra con nanopartículas de oro embebidas en dióxido de titanio cuando son inmersas por debajo del nivel del mar. Se expone que con una técnica interferométrica simple y de bajo costo, es posible desarrollar un profundímetro de alta sensibilidad que puede ser parte de los instrumentos de medición de un equipo autónomo de respiración subacuática (scuba). La importancia de este trabajo se enfoca en el enriquecimiento del conocimiento de la respuesta óptica y mecánica de sensores de presión con aplicaciones potenciales para la biomecánica, la industria, el monitoreo de pozos petroleros o extractores de productos marinos, así como también para equipos de buceo deportivo.

4. Desarrollo

4.1. Teoría

La ley de Snell, la cual rige el efecto de la refracción de un haz, puede escribirse [17],

$$n_1 \sin \theta_1 = n \sin \theta \quad (1)$$

aquí n_1 representa el índice de refracción del medio en que viaja originalmente el rayo incidente, n es el índice de refracción del medio en el que incide el rayo, θ_1 el ángulo de incidencia y θ el ángulo del haz refractado. En nuestro caso, la muestra está compuesta por dos medios: una película delgada de dióxido de titanio con nanopartículas de oro, y un sustrato de dióxido de silicio. Para la película con dióxido de titanio el valor de índice de refracción que corresponde es 2.9; mientras que para el dióxido de silicio es de 1.5. Mediante un elipsómetro calibrado fueron detectados estos valores del índice de refracción. Para calcular los coeficientes de reflexión de amplitud del campo eléctrico en la muestra, utilizamos las ecuaciones de Fresnel [17],

$$r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (3)$$

r_{\perp} y r_{\parallel} corresponden a la polarización perpendicular (\perp) y polarización paralela (\parallel) al plano de incidencia, respectivamente. El subíndice i se refiere al medio desde el que incide la luz y el subíndice t está asociado al medio en el que se transmite la luz en propagación. Para no incurrir en la situación del efecto de reflexión total interna del haz propagándose en la película, se calculó el ángulo al cual aparece este efecto [17],

$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n} \quad (4)$$

la reflexión total interna en la muestra sucede a 31.1° para la frontera dióxido de titanio y dióxido de silicio, mientras que su valor es de 41.8° para la frontera dióxido de silicio y aire. Para el caso en que la muestra está sumergida en agua, este último dato cambia a 62.5° .

4.2. Calibración de la fotodetección

En la figura 1 se ilustra el espectro de absorción óptica asociado a las nanopartículas de oro que forman parte de la muestra estudiada. Es posible observar claramente el pico de absorción característico que corresponde a la excitación del plasmón de resonancia.

El haz transmitido por la muestra fue centrado en el área activa de un detector fotodiodo a la temperatura media del rango a medir. Se verificó que para un cambio de temperatura y presión controladas, existe una desviación del haz por refracción y una transmitancia asociada a un índice de refracción dado por,

$$n = n_0 + \frac{dn}{dT} T + \frac{dn}{dP} P \quad (5)$$

donde n_0 es el índice de refracción de la película delgada a la temperatura inicial del experimento, T es la temperatura y P es la presión en la muestra. Experimentalmente no se encontró ningún efecto de cambio de índice de refracción en una muestra de dióxido de silicio puro, ni en una película de dióxido de titanio puro. El cambio del índice de refracción por temperatura y presión en el sustrato que se manejó durante los experimentos puede ser considerado despreciable de acuerdo a las mediciones. Para evitar reflexión total interna y una máxima propagación del haz en el material, se con-

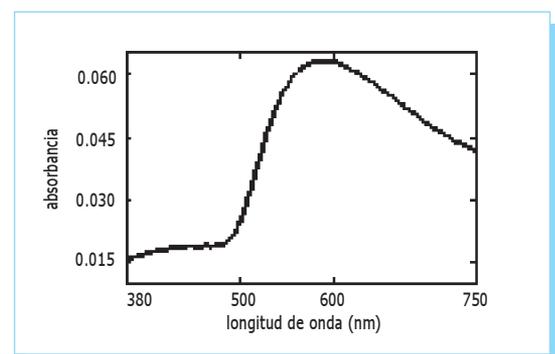


Fig. 1. Espectro de absorción óptica.

sideró que el haz es transmitido con un ángulo de incidencia de 30° y que existe un cambio en la posición del haz debido a la refracción, al cambio de temperatura y a la presión inducida. Dado que el área activa del fotodetector es aproximadamente 1 mm^2 , esta calibración permite garantizar que el cambio de temperatura y presión en la muestra no hará que el haz transmitido salga de la región activa de la detección. El sistema detector fue calibrado primeramente bajo condiciones de laboratorio a presión constante y temperatura variable. Se utilizaron pulsos de un láser sumergible con longitud de onda de 670 nm , y 5 mW de potencia promedio para evaluar el cambio en la temperatura. La figura 2 muestra el esquema experimental desarrollado en el laboratorio. La muestra funciona como un interferómetro Fabry-Perot para el espectro óptico [17]. Inicialmente la muestra fue enfriada en un sistema de refrigeración. El calor sobre la muestra fue suministrado a través de una montura metálica que era calentada por un caudín.

A través de la transmitancia del haz de luz se puede estimar el cambio en el camino óptico de la propagación. La ecuación de la transmitancia de nuestra muestra utilizada como un interferómetro Fabry Perot es [17]:

$$I_t = I_i \left[1 - \frac{A}{1-R} \right]^2 \frac{1}{1 - F \sin^2(\delta/2)} \quad (6)$$

con A como el valor de la absorbancia de la muestra, R la reflectancia, F es el coeficiente de finura y [17],

$$\delta = \frac{4\pi nd}{\lambda} \cos \theta \quad (7)$$

Para este caso $A = 0.1$, $R = 0.5$, $d = 500 \text{ nm}$, $\theta = 30^\circ$ y $n_0 = 2.9$.

4.3. Experimento

Se sometió la muestra a cambios de presión del orden de entre 1 y 3 atmósferas de presión absoluta. Lo cual equivale a 20 metros bajo el nivel del mar con variaciones de tempe-

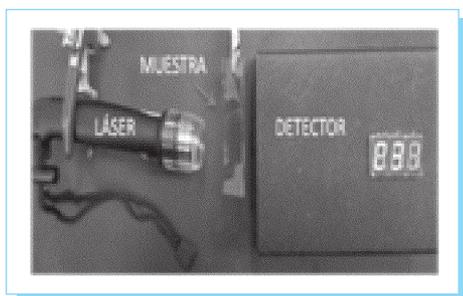


Fig. 2. Arreglo experimental.

ratura de menos de $\pm 1^\circ\text{C}$ y se midió el haz transmitido. Los datos de temperatura de la muestra fueron obtenidos mediante un termómetro digital con resolución de 0.1°C y la profundidad fue monitoreada con un profundímetro analógico de un regulador convencional de un equipo para buceo scuba. Para comparar los resultados numéricos con los datos experimentales, se utilizó como parámetro de ajuste el valor de la intensidad luminosa a la salida de la muestra. En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos.

4.4. Discusión

Existen diferentes dispositivos sensores de presión que usualmente pueden incluirse en un reloj de pulsera pues trabajan con mercurio, sus principales ventajas es que son compactos, ligeros y de bajo costo; sin embargo su capacidad de resolución analógica es limitada. Computadoras de buceo, así como sistemas como el denominado Polatrak Deep Meter poseen altas capacidades para inmersión submarina superior a los $3\,000 \text{ m}$, ya que son capaces de proporcionar mediciones remotas, sin embargo su funcionamiento está basado en efectos eléctricos y deben estar perfectamente aislados en caso que se desee trabajar cerca de materiales explosivos. Diversas publicaciones describen distintos tipos de sensores que permiten conocer las perturbaciones relacionadas con las mediciones de presión e incluso pueden identificar la calidad del medio en el que está inmerso el sensor, especialmente en aguas marinas [18-21]. La desventaja de estos experimentos es la necesidad de un equipo electrónico complejo y en general mayores recursos marinos (equipos de buceo, botes, equipo GPS para emisor y receptor y sensores más robustos). En este trabajo, reportamos por primera vez, de acuerdo a nuestro conocimiento de la literatura, la utilización de un medio nanoestructurado como dispositivo interferométrico para medición de presión dentro del mar. Dada la buena correspondencia de los resultados teóricos y

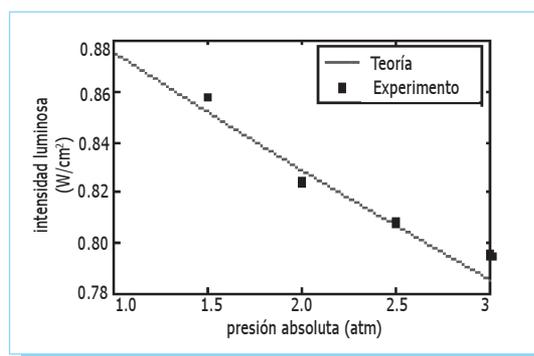


Fig. 3. Intensidad transmitida vs. presión absoluta.

experimentales obtenidos, asumimos que la magnitud de la respuesta del sensor es lo suficientemente grande como para detectar con alta precisión cambios de presión hidráulica de al menos 0.5 atm, que al nivel del mar equivale a cinco metros de profundidad. Una gran ventaja de esta propuesta es que el sistema puede ser construido de forma compacta y a su vez se estima que puede ser montado para detectar, con estimulación pura de luz, variaciones de presión y temperatura de micro o nanoelectromáquinas; o inclusive de sistemas robustos y remotos; así como de sistemas biomecánicos estáticos o dinámicos, ya que la sensibilidad del sistema debiera alcanzar la escala nanoscópica y su respuesta es ultrarápida (en el régimen de los femtosegundos). Para el caso en que no es posible conocer la presión y la temperatura en el medio en el que se desea capturar las señales, se propone que sean utilizadas dos muestras que desempeñen la función de un sensor diferencial. Sin embargo, una desventaja de este último sistema propuesto, es que su grado de complejidad es superior y eso limita la posibilidad de algunas aplicaciones, como aquellas en las que se requiere minimizar espacio o que el sistema sea calibrado automáticamente.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el estudio de un interferómetro tipo Fabry-Perot construido mediante nanopartículas de Oro embebidas en una película delgada de dióxido de titanio crecida en una matriz de dióxido de silicio y estimulada por cambios de presión y temperatura. Se usó un láser sumergible de estado sólido con longitud de onda de 670 nm y 5 mW de potencia promedio para detectar las perturbaciones físicas inducidas sobre la muestra. Se presentan resultados numéricos y experimentales realizados a una profundidad de hasta 20 metros bajo el nivel mar, lo cual equivale a 3 atm de presión absoluta. Las mediciones fueron efectuadas cuando el sistema sensor fue montado como parte del equipo de regulación de aire comprimido para buceo marino. El sistema sensor presenta una significativa magnitud de respuesta a los cambios de presión y tiene aplicaciones potenciales en sistemas de instrumentación que requieran alta sensibilidad y respuesta ultrarápida.

Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades otorgadas al Laboratorio de Catálisis y Materiales de ESQIE-IPN así como a la Corporación de Instructores Mexicanos en Actividades Subacuáticas por el apoyo técnico para las inmersiones. Este trabajo está financiado parcialmente por los proyectos: CONACyT 82708 y SIP2009 -0138, -1070, -0448 y -0974. S. Morales-Bonilla y J. Muñoz-César agradecen a CONACyT y a PIFI la concesión de beca de posgrado.

6. Referencias

- [1] G. Cao, C. J. Brinker, *Annual review of nano research*, Singapore, World Scientific, 2008.
- [2] P. C. Chen, S. C. Mwakwari, A. K. Oyeler, 'Gold Nanoparticles: from Nanomedicine to Nanosensing', *Nanotechnology, Science and Applications*, 45-65, 2008.
- [3] F. Gonella and Mazzoldi, *Handbook of nanostructured materials and nanotechnology*, Academic Press, San Diego, 2000.
- [4] C. Torres-Torres, M. Trejo-Valdez, H. Sobral, P. Santiago-Jacinto, J. A. Reyes-Esqueda, 'Stimulated emission and optical third order nonlinearity in Li-doped ZnO nanorods', *J. of Phys. Chem. C*, 113, 13515-13521, 2009.
- [5] A. López-Suárez, C. Torres-Torres, R. Rangel-Rojo, J. A. Reyes-Esqueda, G. Santana, A. Ortiz, J. C. Alonso, A. Oliver, 'Modification of the nonlinear optical absorption and optical Kerr response exhibited by nc-Si embedded in a silicon-nitride film', *Opt. Express*, 17, 10056-10068, 2009.
- [6] V. Rodríguez-Iglesias, H.G. Silva-Pereyra, C. Torres-Torres, J. A. Reyes-Esqueda, J. C. Cheang-Wong, A. Crespo-Sosa, L. Rodríguez-Fernández, A. López-Suárez, A. Oliver, 'Large and anisotropic third-order nonlinear optical response from anisotropy-controlled metallic nanocomposites', *Opt. Commun.*, 282, 4157-4161, 2009.
- [7] J. A. Reyes-Esqueda, V. Rodríguez-Iglesias, H.-G. Silva-Pereyra, C. Torres-Torres, A.-L. Santiago-Ramírez, J. C. Cheang-Wong, A. Crespo-Sosa, L. Rodríguez-Fernández, A. López-Suárez, A. Oliver, 'Anisotropic linear and nonlinear optical properties from anisotropy-controlled metallic nanocomposites', *Opt. Express*, 17, 12849-12868, 2009.
- [8] C. Torres-Torres, M. Trejo-Valdez, J. Moreno-Valenzuela, 'Molecular Gastronomy and Multiphoton Interactions with Gold Nanoparticles Heating Olive Oil', *Rev. Tecnolog@*, 2, 13-17, 2009.
- [9] C. Torres-Torres, J. A. Reyes-Esqueda, J. C. Cheang-Wong, A. Crespo-Sosa, L. Rodríguez-Fernández, A. Oliver, 'Optical third order nonlinearity by nanosecond and picosecond pulses in Cu nanoparticles in ion-implanted silica', *J. of Appl. Phys.*, 104, 014306, 2008.
- [10] H. Rigneault, J.-M. Lourtouuz, C. Delalande, A. Leven, *Nanophotonics*, Newport Beach, CA USA: ISTE Ltd, 2006.
- [11] C. Torres-Torres, A. V. Khomenko, J. C. Cheang-Wong, A. Crespo-Sosa, L. Rodríguez-Fernández, A. Oliver, 'Absorptive and refractive nonlinearities by four wave mixing in Au nanoparticles in ion-implanted silica', *Opt. Express*, 15, 9248-9253, 2007.
- [12] C. Torres-Torres, A. López-Suárez, L. Tamayo-Rivera, R. Rangel-Rojo, A. Crespo-Sosa, J. C. Alonso, A. Oliver,

- ‘Thermo-optic effect and optical third order nonlinearity in nc-Si embedded in a silicon-nitride film’, *Opt. Express*, **16**(22), 18390-18398, 2008.
- [13] H. Long, A. Chen, G. Yang, Y. Li, P. Lu, ‘Third-order optical nonlinearities in anatase and rutile TiO₂ thin films’, *Thin Solid Films*, **517**(19), 5601-5604, 2009.
- [14] C. Zhang, Y. Liu, G. You, B. Li, J. Shi, S. Qian, ‘Ultrafast nonlinear optical response of Au:TiO₂ composite nanoparticle films’, *Physica. B, Condensed matter*, **357**, 334-339, 2005.
- [15] H. B. Liao, R. F. Xiao, H. Wang, K. S. Wong, and G. K. L. Wong, ‘Large third-order nonlinearity in Au:TiO₂ composite films measured on a femtosecond time scale’, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1817, 1998.
- [16] K. Iliopoulos, G. Kalogerakis, D. Vernardou, N. Katsarakis, E. Koudoumas, S. Couris, ‘Nonlinear optical response of titanium oxide nanostructured thin films’, *Thin Solid Films*, **518**(4), 1174-1176, 2009.
- [17] Zajac, Hecht, *Óptica*, 3^o ed., Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000.
- [18] Otto S. Wolfbies, ‘Fiber-Optical Chemical sensors and biosensors’, *Analytical Chem.* **76**, 3279-3284, 2004.
- [19] K. Weir ‘Optical Fiber Sensor Technology’, *J. of Modern Optics*, **42**, 938, 1995.
- [20] M. H. H. Jumali, I. Izzuddin, N. Ramli, M. M. Salleh, M. Yahaya, ‘Comparative studies on microstructural and gas sensing performance of Ti and TiO₂-PANi nanocomposite thin films’, *Sol. State Sci. and Tech.*, **17**(1), 126-131, 2009.
- [21] T. Fu, D. Doonan, C. Utley, B. Benson, R. Kastner, ‘Aqua Modem Tests in Moorea’, *Jacob’s school of Engineering Research Expo* 2008.

ACE-X 2010

4th

International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting

8 & 9 July 2010

www.ace-x2010.com