
Análisis de Registros de Patrones de Speckle Modulado de Baja Frecuencia en un Cristal BSO

Analysis of Speckle Patterns Records Low Frequency Modulation in a BSO Crystal

Giovany A. Meza C¹; Néstor Bolognini², Myrian Tebaldi², Jorge E. Rueda¹

¹ Grupo Óptica Moderna. Departamento de Física. Universidad de Pamplona. Colombia

² Centro de Investigaciones Ópticas, CIOP (CONICET, CIC)-UID OPTIMO, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Plata, Argentina

RESUMEN

En este trabajo se analizan los patrones de speckle formados por un sistema óptico con doble abertura almacenados en un cristal fotorrefractivo BSO. La modulación interna de los speckles depende de la separación y orientación de las aberturas. Debemos destacar que si bien generalmente el speckle ha sido estudiado mediante un enfoque bidimensional, su naturaleza de volumen debe tenerse en cuenta en un análisis profundo. A partir de los resultados obtenidos, se comprueba que la eficiencia de difracción depende del tamaño de los granos de speckle, la frecuencia de las franjas moduladoras, la orientación de las franjas con respecto al campo externo aplicado al cristal fotorrefractivo y la magnitud de este campo. Se verifica que los resultados concuerdan con lo predicho por la teoría de haces acoplados para una geometría de transmisión.

Palabras clave: cristales fotorrefractivos, speckle, eficiencia de difracción.

* Para citar este artículo: Meza C GA ; Bolognini N, Tebaldi M, Rueda JE, Análisis de Registros de Patrones de Speckle Modulado de Baja Frecuencia en un Cristal BSO .Bistua 2010;8(1):97-103

+Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de separatas: Facultad de Ingeniería, Universidad de La Plata, Argentina
E-mail: nestorb@ciop.unlp.edu.ar

ABSTRACT

In this paper we analyze the speckle patterns formed by a double-aperture optical system stored in a photorefractive crystal BSO. The internal modulation of Speckles depends on the separation and orientation of opening. We emphasize that while generally the speckle has been studied by two-dimensional approach, the nature of volume must be considered in depth analysis. From the results, it is found that diffraction efficiency depends on the size of grains of speckle, the frequency of the fringes modulating the orientation of the stripes with respect to the external field applied to the photorefractive crystal and the magnitude of this field. It turns out that the results agree with those predicted by the theory of coupled beams for transmission geometry.

Keywords: photorefractive crystals, speckle, diffraction efficiency

INTRODUCCIÓN

El speckle o granularidad óptica, se observa cuando un haz de luz altamente coherente (láser) es reflejado ó transmitido por una superficie rugosa (difusor) en la escala de la longitud de onda generando una distribución de intensidades aleatorias. Cuando en la generación de dicho fenómeno interviene un sistema formador de imagen como una lente, una cámara o el propio ojo humano éste recibe el nombre de Speckle subjetivo, de lo contrario recibe el nombre de speckle objeto. El speckle es un fenómeno, dada su naturaleza aleatoria se ha estudiado con

métodos analíticos de la estadística. (Francon M.(1979)),(Goodman J. W.(1975)). El speckle a pesar de su naturaleza de volumen se ha estudiado en general según un análisis bidimensional. Sin embargo cuando se emplean medios de registro tridimensionales la importancia del volumen se hace evidente. Los cristales fotorrefractivos son medios de almacenamiento de información en volumen de gran capacidad (Günter P. y Eichler H. J, (1968),(Huignard P. y Günter P.,(1989))

Estos materiales presenten fotoconductividad y efecto electro-óptico lineal de tal forma que al ser iluminados mediante una distribución inhomogénea resulta por las propiedades mencionadas una distribución de índice de refracción del material que replica la distribución luminosa recibida. En este trabajo, se han estudiado las características de los patrones de speckle modulados registrándolos en un cristal fotorrefractivo BSO de la familia de las silenitas. Las redes de índice de refracción almacenadas, serán estudiadas a través del observable: eficiencia de difracción. Los resultados experimentales serán comparados con los resultados esperables del modelo de ondas acopladas (Kukhtarev N. V., et al,(1979)),(Yeh P.(1993)).

ESQUEMA EXPERIMENTAL

La fig. 1. muestra el montaje experimental utilizado. Un haz expandido y colimado ilumina un difusor, cuya imagen es formada mediante la lente L1 en el volumen del cristal. La lente consta de una máscara opaca con dos aberturas circulares de diámetro D simétricamente ubicadas respecto del eje óptico. Dada la alta sensibilidad de los cristales fotorrefractivos BSO utilizados como medio de almacenamiento en la región verde-azul del espectro visible, se ve un láser de Nd YAG ($\lambda_w = 532\text{nm}$) en el proceso de registro. Las caras del cristal son perpendiculares a las direcciones $\langle \bar{1}10 \rangle$, $\langle 001 \rangle$ y $\langle 110 \rangle$, las cuales, coinciden respectivamente con los ejes X, Y y Z. Las dimensiones del cristal son $L_x = L_y = 10\text{mm}$ y $L_z = 6\text{mm}$, por lo que una diferencia de potencial V en las caras $\langle \bar{1}10 \rangle$ y $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ generaran un campo eléctrico $E_x = V/L_x$.

Cada apertura genera una distribución de speckle que aunque están decorrelacionadas son coherentes entre sí y al superponerse en el volumen del medio generan un sistema de franjas de interferencia que modulan el patrón de speckle resultante, generándose así en el cristal micro-redes de índices a través del efecto fotorrefractivo con un periodo $\Delta = \lambda_w Z_c/d$. Las dimensiones promedio del diámetro y la longitud de estos speckles subjetivos son $S_r \approx \lambda_w (Z_c/D)$ y $S_z \approx \lambda_w (Z_c/D)^2$ respectivamente. Al superponerse dos speckles provenientes de cada abertura, determinan una región de superposición, dada por (Tebaldi M, et al(2002)).

$$L_{\text{Speckle}} = \begin{cases} S_z & \text{si } \varphi < \tan^{-1}(S_r/S_z) \\ S_r/\sin \varphi & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

donde $\varphi = d/2Z_c$.

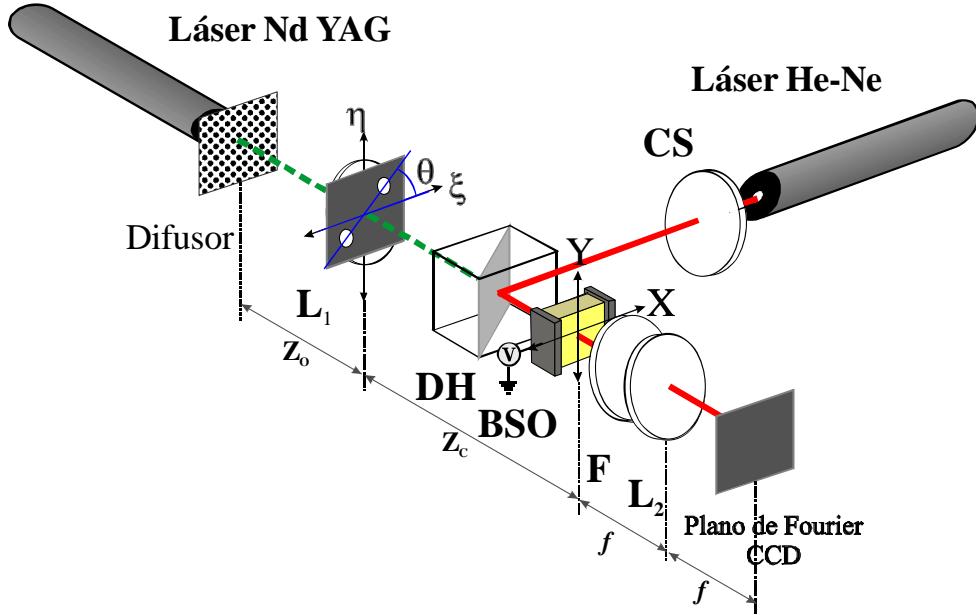


Fig 1. Montaje experimental L_1, L_2 Lentes, DH: divisor de haz, F: Filtro Verde, CS: sistema colimador, Z_0 : distancia difusor-lente ($Z_0 = 13.2\text{cm}$), Z_c : distancia lente-cristal ($Z_c = 47.4\text{cm}$), θ : ángulo formado por la línea que pasa por los centros de las aberturas y el eje ξ .

Las variaciones del índice de refracción que se generan en el cristal se pueden expresar de la forma (Tebaldi et al(2002), (Tebaldi et al, (1998)):

$$\Delta n = r_{41} n^3 \left[\frac{E_d^2 + (\vec{R} \cdot \vec{E}_0)^2}{\left(1 + \frac{E_d}{E_q}\right)^2 + \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{E}_0}{E_q}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

donde r_{41} es el coeficiente electroóptico lineal, n el índice de refracción del cristal sin perturbar, \vec{E}_0 es el campo aplicado al cristal, E_d es el campo de difusión y E_q es el campo de saturación, \vec{R} es un vector unitario en dirección del vector de onda de red.

En la etapa de lectura, se utiliza un láser He-Ne ($\lambda_R = 633\text{nm}$) colimado linealmente polarizado y fuera del rangopectral de sensibilidad del cristal, con lo cual se evita degradar el registro.

De acuerdo a la teoría de haces acoplados, la eficiencia de difracción es (Yeh P.,(1993)).

$$\eta = \frac{k^2}{k^2 + \left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right)^2} \sin^2 \left\{ kL \left[1 + \left(\frac{\Delta\alpha}{2k} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (3)$$

donde $\Delta\alpha = K \left(\frac{\cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right) \Delta\theta$ es el módulo del vector off-Bragg, $k = \frac{\pi n \Delta n}{\lambda_R \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$ es la constante de acoplamiento, $K = 2\pi/\Lambda$ es el módulo del vector de onda de red y $\Delta\theta$ es el ángulo de lectura off-Bragg fuera del cristal, θ es el ángulo de Bragg de lectura externo al cristal $\theta = (\lambda_R/\lambda_w)\varphi$, donde φ es el ángulo de escritura también externo, n es el índice de refracción del material, Δn es la variación del índice de refracción del material.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Fig 2 muestra la intensidad de los órdenes de difracción registrados en el plano de Fourier. Las Figura 2 (a) y 2 (c), corresponden a una lectura off-Bragg mientras que la Figura 2 (b), corresponde a una lectura “On-Bragg”, que se cumple cuando el vector de propagación del haz de

lectura se encuentra en la dirección $\theta_B \approx \lambda_R/2\Delta = \lambda_R d/2\lambda_w Z_C$. Se puede observar entonces, que cada armónico lateral, es la reconstrucción de cada haz de registro, y que la eficiencia de difracción para cada haz se puede controlar variando el ángulo de lectura. Estas características de selectividad que rigen el comportamiento de la eficiencia de difracción en nuestro registro son consecuencia del carácter de volumen de este.

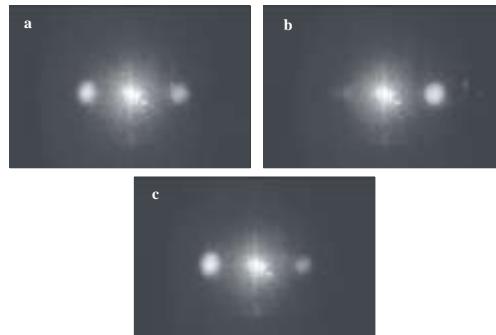


Fig 2. Ángulo de lectura. **a.** y **c.** “off-Bragg” **b.** “on-Bragg”

El comportamiento dinámico de la formación de la red o evolución temporal de la eficiencia de difracción, se muestra en la Fig. 3. Cada punto de la figura es el valor promedio de intensidad del haz difractado en condición de Bragg. En esta figura se puede observar que la evolución temporal de la intensidad difractada alcanza un estado estacionario. Estos puntos se ajustan a la ecuación $I = I_0 - A_1 \exp(-t/t_1)$ de acuerdo al análisis teórico de la velocidad de formación de la red (Yeh P., (1993)).

Notese que la intensidad media en el cristal es proporcional al área de las aberturas de la pupila, el tiempo de saturación para mantener constante la exposición media, disminuirá en proporción inversa al diámetro de estas. Este comportamiento se observa en la Fig 4, donde se estima el tiempo necesario para alcanzar la saturación de acuerdo al diámetro de las aberturas. Estos tiempos de registro al igual que los de borrado de la red son importantes en aplicaciones de procesamiento de imágenes y metroología speckle. Para los anteriores resultados se utiliza una pupila con diferentes diámetros de aberturas orientadas en dirección del campo $\vartheta = 0^\circ$, con una separación entre centros $d = 14,00 \pm 0,05 \text{ mm}$, un campo externo aplicado $E_0 = 1166,6 \pm 0,2 \text{ kV/m}$ y un periodo de red igual a $\Delta = 17,4 \pm 0,1 \mu\text{m}$.

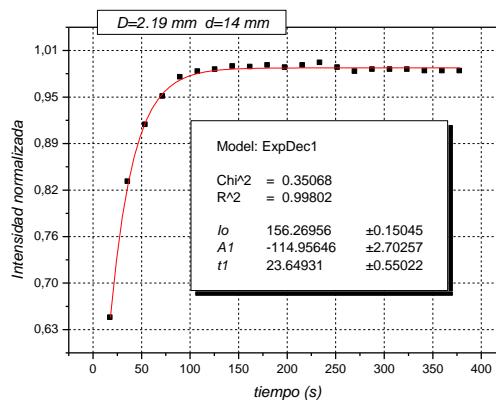


Figura 3. Intensidad normalizada en función del tiempo de registro.
Donde $d = 14,00 \pm 0,05 \text{ mm}$, $D = 2,60 \pm 0,05 \text{ mm}$, $E_0 = 1166,6 \pm 0,2$

kV/m , $\Delta = 17,4 \pm 0,1 \mu m$ y $\theta = 0^\circ$.

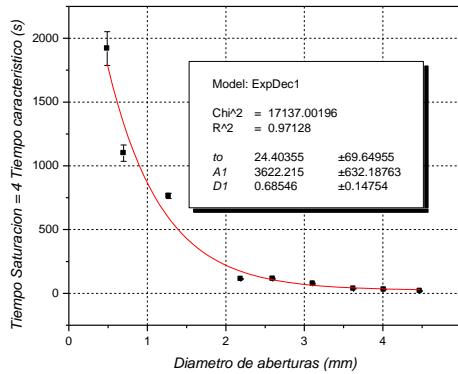


Fig 4. Tiempo requerido aproximado para la formación de una red fotorrefractiva en función del diámetro.

La fig 5, muestra la eficiencia de difracción en términos del campo externo. En este caso se utilizó una pupila con diámetros de aberturas $D = 2.55 \pm 0,05 mm$, y separación entre centros $d = 10,00 \pm 0,05 mm$, con un ángulo $\theta = 0^\circ$ con respecto al eje ξ , y periodo de red $\Delta = 24,4 \pm 0,1 \mu m$. Cada registro se hizo con un mismo tiempo de exposición. Se puede observar que para valores grandes del campo aplicado la eficiencia de difracción empieza a disminuir en comparación al comportamiento teórico, esto se debe a inestabilidad en los registros. En ausencia del campo se puede notar, que no hay difracción observable. Esto se debe, a que el transporte de cargas por difusión, es insuficiente para contribuir a la formación de la red (el campo de difusión estimado en este caso es $E_d = 6,67 \pm 0,03 kV/cm$)

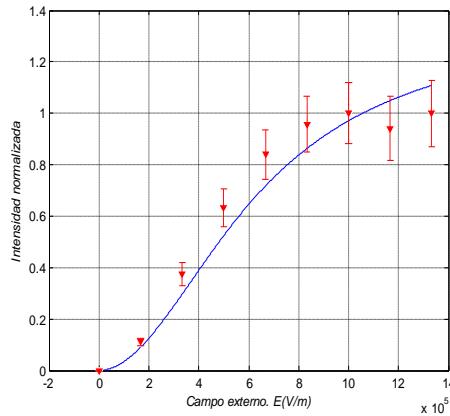


Fig 5. Intensidad normalizada en función del campo externo aplicado

Conocido el efecto del campo externo aplicado a la eficiencia de difracción y si miramos la Ec.(3) notaremos, que la componente del campo externo aplicado en la dirección del vector de onda de red, es la contribución más importante en la variación del índice de refracción, que en este caso son valores del orden de 10^{-4} para un índice de refracción de 2.53 en la longitud de onda de lectura. Por lo que la variación del índice de refracción y por ende la eficiencia de difracción (ver Ec. 3, 4 y 6) disminuirán, a medida que la dirección del vector de onda de red se desvíe de la del campo aplicado.

En La fig 6, muestra los valores de la eficiencia de difracción en términos de la orientación del

segmento que une los centros de las aperturas respecto al eje ξ . Las medidas fueron realizadas para un diámetro de las aberturas $D = 2.55 \pm 0,05\text{mm}$, separación entre centros $d = 10,00 \pm 0,05\text{mm}$ y un campo externo aplicado $E_0 = 833.33 \pm 0,2\text{kV/m}$. Cuando la orientación de las aberturas es perpendicular a la dirección del campo, la eficiencia de difracción es muy baja. Este fenómeno se observa debido a la presencia de micro-redes registradas en el cristal con direcciones ligeramente apartadas del vector de onda de red, producto de la dimensión de las aberturas. Este efecto disminuirá, a medida que los tamaños de las aberturas tiendan a disminuir.

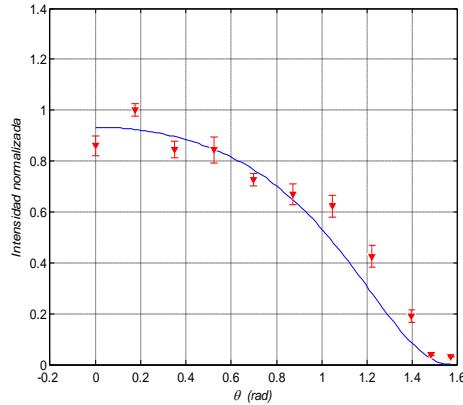


Fig 6. Intensidad normalizada en función del ángulo de la pupila. Para $d = 10,00 \pm 0,05\text{mm}$, $D = 2,55 \pm 0,05\text{mm}$, $E_0 = 833.33 \pm 0,2\text{kV/m}$, $\Delta = 21,5 \pm 0,1\mu\text{m}$.

La Fig 7, muestra la eficiencia de difracción en función del diámetro de las aberturas. El registro se llevó a cabo con un campo externo aplicado $E_0 = 1166,6 \pm 0,2\text{kV/m}$, para una misma separación entre centros a la que corresponde un periodo de red $\Delta = 17,4 \pm 0,1\mu\text{m}$.

Observando la Fig 7 se puede inferir la naturaleza de volumen de los speckles y su relación con el espesor del medio de registro. Al disminuir el diámetro de las aberturas, se observa un aumento en la eficiencia de difracción en concordancia con un aumento de la profundidad de la red de índices que modulan los speckles. En particular, al aumentar las dimensiones de los speckles se incrementara la eficiencia de difracción hasta el punto donde la profundidad de la red moduladora de los speckles sobrepasa la dimensión del cristal. A partir de allí una disminución adicional en el diámetro no se refleja en un aumento de la eficiencia. Por lo tanto, en la ecuación de ondas acopladas la profundidad efectiva debe reformularse según:

$$L = \begin{cases} L_{\text{Speckle}} & \text{si } L_{\text{Speckle}} < L_z \\ L_z & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

donde L_z es el espesor del cristal.

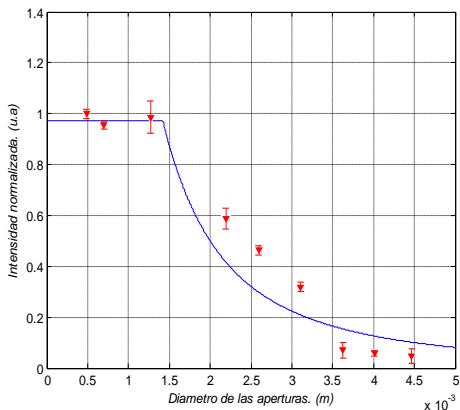


Fig 7. Eficiencia de difracción en función del diámetro de las aberturas.

Para $d = 14,00 \pm 0,05\text{mm}$, $E_0 = 1166,6 \pm 0,2\text{kV/m}$, $\Delta = 17,4 \pm 0,1\mu\text{m}$ y $\theta = 0^\circ$.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado el carácter de volumen de los patrones de speckle a partir de la eficiencia de difracción de sus registros en un cristal BSO en configuración transversal.

Se pudo establecer mediante este estudio, una curva aproximada del tiempo de saturación de los registros, para diferentes tamaños de aberturas en nuestras condiciones, lo cual es de interés teniendo en cuenta que este tiempo de respuesta, es importante cuando se realizan registros de múltiples patrones de speckle los cuales podrían ser objeto de futuras investigaciones.

Se comprueba que al aumentar las dimensiones de los speckles se incrementara la eficiencia de difracción hasta el punto donde la profundidad de la red moduladora de los speckles sobrepasa la dimensión del cristal. A partir de allí una disminución adicional en el diámetro no se refleja en un aumento de la eficiencia. Esto comportamiento corrobora el carácter 3D de los patrones de speckle y que se ponen de manifiesto al almacenarse en un medio de volumen tal como los cristales fotorrefractivos. Los parámetros geométricos del sistema formador de imagen (diámetro de las aperturas, separación entre ellas y distancia imagen) y el campo externo aplicado permiten controlar dicha eficiencia de difracción.

Los resultados experimentales obtenidos concuerdan con la teoría de ondas acopladas.

Estos resultados pueden aplicarse convenientemente para optimizar experiencias de metrología speckle, detección de objetos de fase, criptografía, multiplexado de información, etc.

Referencias

- 1.- M. Francon, *Laser Speckle and applications in optics*, Academic Press, New York (1979) pp.16.
- 2.- J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns" en *Laser speckle and related phenomena*, J. C. Dainty ed., Springer-Verlag, New York (1975) Cap. 2
- 3.- P. Günter y H. J. Eichler, "Introduction to Photorefractive Materials", Proc. International School on Materials Science and Technology: *Electro-optic and Photorefractive Materials*, Ed. P. Günter, Springer-Verlag, (1968) 206-228.
- 4.- P. Huignard. P. Günter (Eds), *Photorefractive material and their Applications II*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- 5.- N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin y V. L. Vinetsskii, "Holographic storage in electrooptic crystals", *Ferroelectrics* 22 (1979) 749-764.
- 6.- P. Yeh, *Introduction to Photorefractive Nonlineal Optics*, John Wiley & Sons (1993).
- 7.- M. Tebaldi, A. Lencina, N. Bolonini, *Opt. Commun.* 202 (2002) 257-270.

8.-M. Tebaldi, L. Angel Toro, M. C. Lasprilla, N. Bolognini, Opt. Commun. 155, (1998) 342.