

---

# Optimización del Esquema Experimental para Registro de Speckles Generados a Partir de Superficies Reflectantes

Martha Molina<sup>1,2</sup>, María del Carmen Lasprilla<sup>1</sup>, Myrian Tebaldi<sup>3</sup>, Néstor Bolognini<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS), Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM), Universidad Industrial de Santander, Colombia.

<sup>2</sup> Docente en Comisión, Grupo Óptica Moderna (GOM), Universidad de Pamplona, Colombia.

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET-CIC) P.O. Box 124, La Plata (1900), Argentina y UID OPTIMO, Facultad Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

<sup>4</sup> Facultad Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

---

## RESUMEN

Se presenta un arreglo experimental novedoso para el registro de speckles modulados generados a partir de una superficie reflectora. Se ilumina la superficie, en este caso con una fuente proveniente de un láser, con el objeto de formar una imagen de la misma. Este proceso implica desviar de la dirección fuente-superficie el frente de onda que constituirá la imagen. Y por lo tanto es necesario incluir un elemento divisor de haz con la inevitable pérdida de energía tanto en la iluminación de la superficie bajo estudio cuanto en el proceso de formar imagen. Para evitar esta situación se utiliza un espejo con un orificio por el cual pasa el haz láser que ilumina la superficie. A su vez el frente de onda reflejado incide en el mismo espejo colectando la energía que se empleará en la formación de la imagen. Los speckles modulados se registran en un cristal fotorrefractivo tipo silenita BSO. Se estudia la eficiencia de difracción en término de la frecuencia de las franjas moduladoras, el tamaño del speckle, la orientación del haz de reconstrucción respecto al impuesto por la condición de Bragg y el espesor del cristal empleado como medio de registro.

**Palabras Clave:** speckle, cristales BSO

## ABSTRACT

A novel experimental arrangement of modulated speckles generated from a reflective surface is presented. An image of the surface is formed by using a laser source. This procedure implies deviates from the source-surface direction of the wavefront that constitutes the image. Therefore, it is necessary to position the beam splitter with the corresponding unavoidable energy losses. To avoid this situation a mirror with a tiny hole, which allows both the transmitting of the whole laser beam and the collection of the whole image wavefront. The modulated speckles are registered in a photorefractive crystal. The diffraction efficiency in terms of the modulated fringe frequency, speckle size, crystal width and the reconstruction beam orientation are registered.

**Keywords:** Speckle, Photorefractive crystals.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las distribuciones de speckle presentan importantes aplicaciones en el campo de la metrología óptica [1-3]. En particular, las técnicas de speckle fueron ampliamente utilizadas para medidas de pequeños desplazamientos, deformaciones, medidas de rugosidad de superficies, etc. Los primeros trabajos empleaban como medio de registro películas fotográficas, con la consecuente imposibilidad de trabajar en tiempo real. En ese aspecto los cristales fotorrefractivos representaron una alternativa de registrar estas distribuciones en tiempo real [4-6].

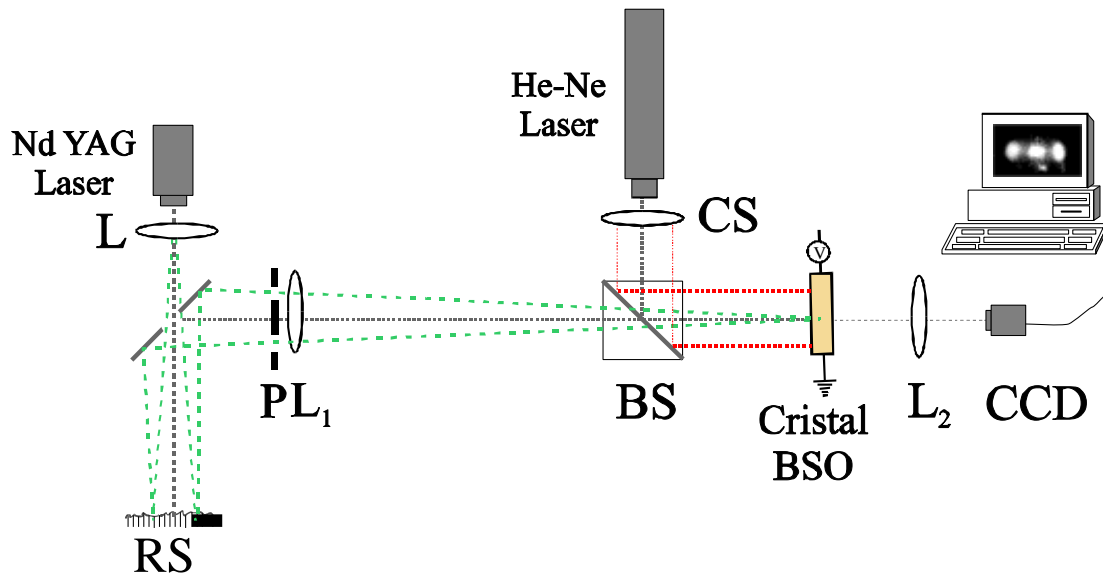
Los cristales silenitas BSO han sido empleados para medidas de desplazamiento y rotaciones de superficies difusoras [7]. Aunque las distribuciones de speckle son de naturaleza 3D, en estos trabajos, no se la tuvo en cuenta. En Refs. [8-11] se verificó la dependencia de la eficiencia de difracción con las características volumétricas del speckle. En ese sentido, en Refs. [12-13] se propusieron técnicas de registro en cristales BSO basadas en la modulación de distribuciones de speckle para el almacenamiento de múltiples imágenes, operaciones lógicas XOR y AND entre imágenes y desplazamientos en el plano.

En los trabajos previos de metrología speckle que involucran objetos difusores reflectantes la geometría de registro presentan la limitación de una considerable pérdida de energía tanto de la fuente cuanto del objeto difusor dado que es

usual emplear divisores de amplitud. Por eso motivo se propone estudiar el empleo de una alternativa al elemento divisores de amplitud. Luego, utilizando esta variante en el arreglo experimental, se analizó el registro y reconstrucción de speckles modulados en geometría de reflexión. Se comprobó que el esquema alternativo conduce a una respuesta de la eficiencia de difracción tan buena como aquella obtenida en trabajos previos para el esquema de transmisión.

## 2. ANÁLISIS DEL ESQUEMA EXPERIMENTAL

En nuestra propuesta, el esquema experimental utilizado para estudiar la eficiencia de difracción de superficies difusoras incluye un espejo de primera superficie reemplazando a un divisor de amplitud. En el esquema de la Figura 1, se observa el arreglo experimental. Un haz de un laser de Nd YAG doblado, continuo que emite en 532 nm con una potencia de 100 mW es expandido y direccionado a la superficie difusora bajo análisis. El haz expandido pasa por el orificio realizado en el espejo de primera superficie sin producir efectos de difracción de bordes. La lente  $L_1$  forma una imagen de la superficie difusora en el volumen del cristal fotorrefractivo. Esta lente tiene adosada una pupila con una doble apertura formada por dos orificios circulares idénticos simétricamente ubicados respecto al eje óptico del sistema. El espejo se ubica de tal manera que la intersección entre el eje que une el láser y el difusor y el eje del sistema óptico se encuentra en el centro del orificio el espejo.

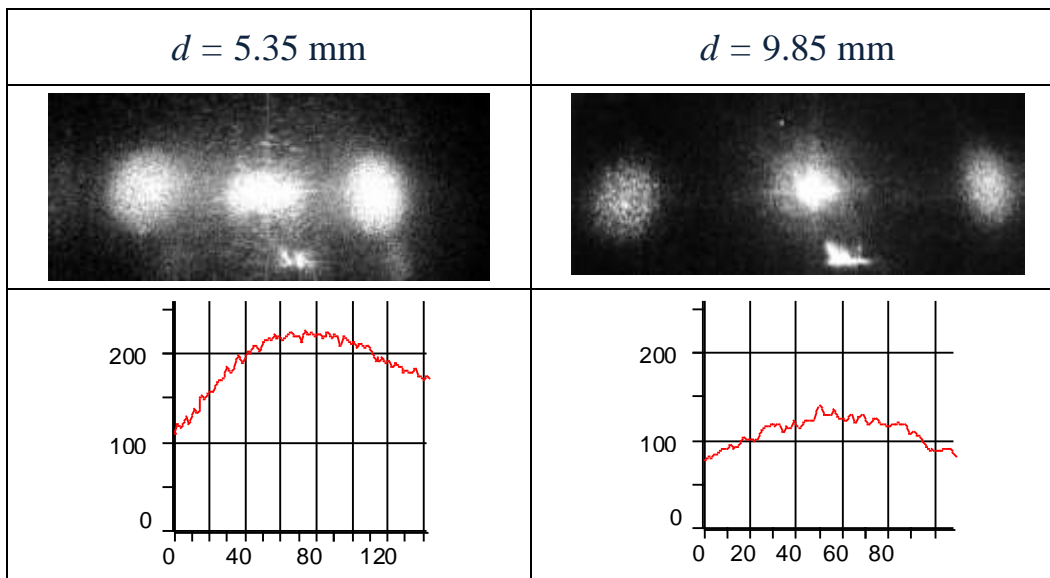


**Figura 1.** Esquema experimental (CS: sistema colimador; BS: divisor de amplitud; P: máscara con doble apertura;  $L_1$ ,  $L_2$ : lentes; L: objetivo de microscopio; RS: superficie difusora)

Cabe recordar la naturaleza de volumen del speckle dependiendo del tamaño promedio del speckle imagen del diámetro de la apertura del sistema óptico, la distancia imagen y la longitud de onda de la fuente empleada. En nuestro caso el sistema de doble apertura permite generar un sistema de franjas de interferencia dentro del volumen de cada grano de speckle. Estas distribuciones de speckle moduladas son almacenadas en el medio fotorrefractivo como redes de índices cuyo volumen finito se corresponde con el de los granos de speckle. En nuestra propuesta se indaga la eficiencia de difracción de dichas redes. En analogía a lo que ocurre en el caso de un holograma de volumen, a medida que aumenta la separación entre las aberturas de la pupila, se produce una disminución en la eficiencia de difracción. Para verificar este hecho se analizó la distribución de intensidad en el plano focal de la lente  $L_2$  (plano de Fourier) en términos de distintas situaciones experimentales. Nótese que como se observa en la Figura 2 aumentar la separación entre las aberturas equivale a aumentar el ángulo de registro dado por:  $\theta_0 = \frac{d}{2 Z_C}$  ( $Z_C$  es distancia imagen, distancia de la lente al cristal fotorrefractivo;  $d$  es la separación entre los centros de las aberturas de la pupila). La separación de las franjas de interferencia es:  $\Delta = \frac{\lambda_{registro} Z_C}{d}$  y coincide con la separación de los planos de la red de índice. Una

reconstrucción usual para el caso de medios planos contempla la incidencia normal del haz de lectura o reconstrucción en el medio de almacenamiento. Si el registro realizado tiene características volumétricas como las redes de índice mencionadas, es evidente que la reconstrucción bajo incidencia normal implicará un apartamiento de la condición de Bragg (“off-Bragg”) dado por  $\Delta\theta = \frac{\lambda_{lectura}}{\lambda_{registro}} \frac{d}{2Z_C}$ . Estos aspectos fueron analizados en término de los distintos

parámetros experimentales. La Figura 2 muestra la distribución luminosa en el plano de Fourier en la etapa de reconstrucción en el caso de incidencia normal al cristal. En esta experiencia se empleo un cristal BSO de 10mm x 10mm x 10mm y se le aplico un campo externo de 7kV/cm. En este caso el diámetro de las aberturas D se fijo en 2.6 mm y la distancia imagen en 440 mm. Los “spots” laterales representan los órdenes de difracción bajo estudio. En estas condiciones el parámetro off-Bragg toma el mismo valor para ambos órdenes. En la Figura 2 se observa que a una separación menor entre las aberturas le corresponde una mayor intensidad en los órdenes de difracción que se corresponde con un valor menor en el respectivo parámetro off-Bragg.

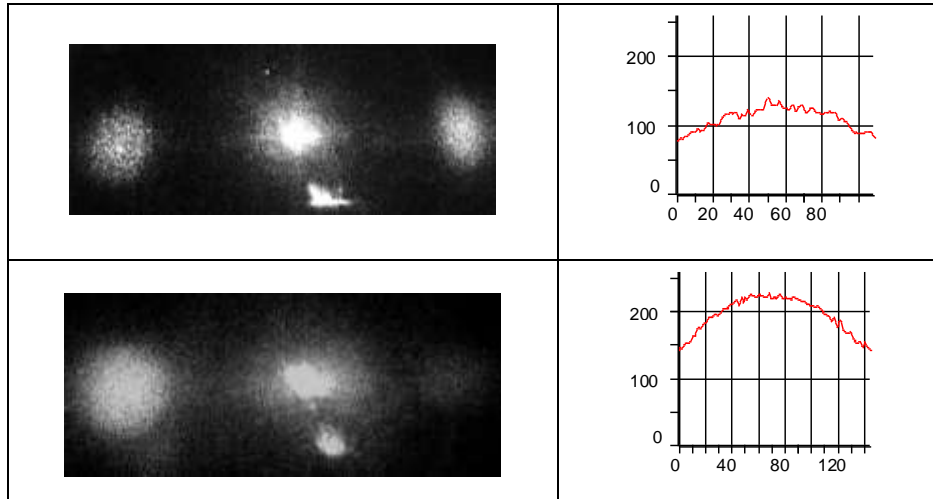


**Figura 2.** a) Distribuciones de intensidad en el plano de Fourier para dos separaciones entre aberturas. b) perfil de intensidad de intensidad correspondiente a uno de los órdenes laterales.

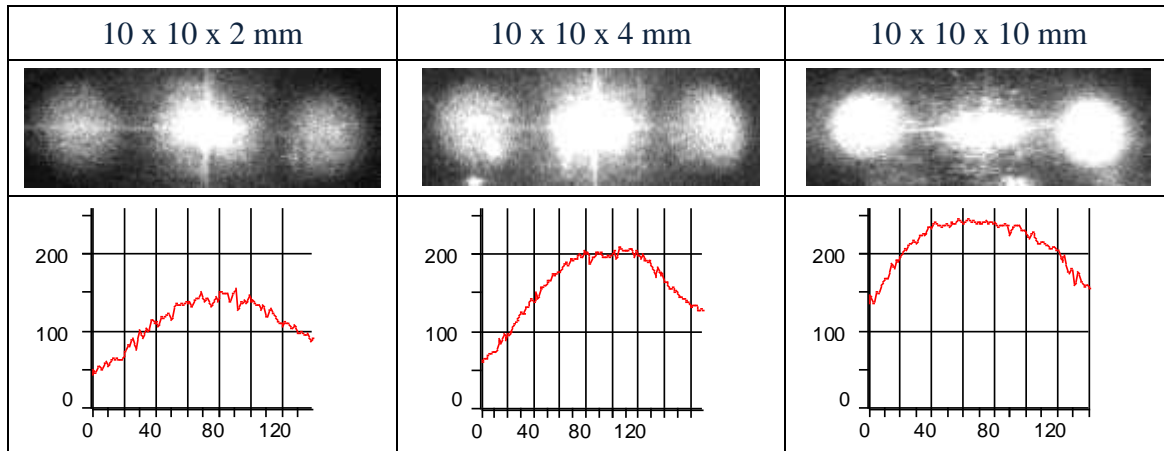
La Figura 3 describe la dependencia de la intensidad de los órdenes reconstruidos en términos de la orientación del haz de lectura ó reconstrucción. En la Figura 3 a) se observa la intensidad de los órdenes cuando la orientación del haz de lectura corresponde a incidencia normal al cristal fotorrefractivo. Se observa un notorio aumenta en la intensidad del orden difractado cuando el haz de lectura incide en condición de Bragg para dicho orden (ver Figura 3 b)). Estos resultados verifican el carácter volumétrico de las redes de índices almacenadas a partir de las distribuciones de speckle.

El carácter volumétrico también se ve reflejado en la intensidad de los órdenes difractados cuando se modifica el espesor del cristal fotorrefractivo en el cual se almacenaron las distribuciones de speckle moduladas. Los resultados mostrados en la figura 4 se obtuvieron para  $Z_C = 440 \text{ mm}$ ,  $D = 2.65 \text{ mm}$ ,  $d = 6.35\text{mm}$ , esto genera speckle cuya profundidad promedio vale  $S_Z \approx \lambda_{registro} \left( \frac{Z_C}{D} \right)^2$ . Se observa en la Figura 4 que en los cristales de mayor espesor

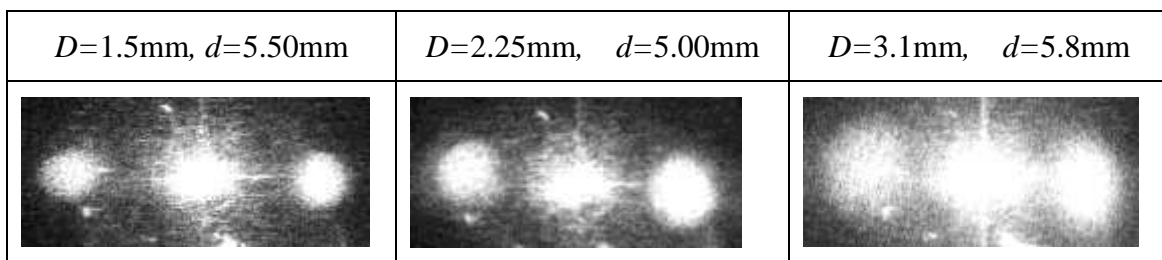
aumenta la eficiencia de difracción. Dado que los tres casos el volumen del speckle es el mismo, debe concluirse la validez de su carácter tridimensional, ya que solo en ese caso se corrobora que la intensidad de los órdenes aumenta con el espesor del cristal.

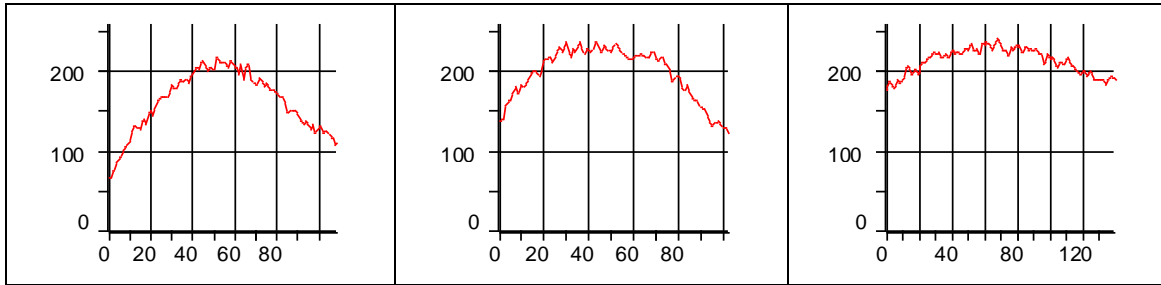


**Figura 3.** Distribuciones de intensidad en el plano de Fourier y perfiles de intensidad cuando la separación entre los centros de las aberturas es  $d=9.85$  mm a) a incidencia normal y b) en condición de Bragg de uno de los ordenes



**Figura 4.** Distribuciones de intensidad en el plano de Fourier y perfiles de intensidad a incidencia normal para cristales de distintos espesores





**Figura 5.** Distribuciones de intensidad en el plano de Fourier y perfiles de intensidad a incidencia normal para diferente tamaño de las aberturas

En la Figura 5, se observa la intensidad de los órdenes difractados correspondientes a distintos diámetros de aberturas, manteniendo aproximadamente constante la separación entre ellas. Esto implica que las redes de índice que se forman tienen el mismo espaciado pero difieren notablemente en volumen dada la relación inversa entre éste y el diámetro de las aberturas. A partir de los resultados resulta evidente una mayor dispersión a medida que disminuye el volumen del grano de speckle, es decir, si bien el apartamiento de la condición de Bragg es aproximadamente el mismo en los tres casos, la fracción del haz de lectura que contribuyera estos órdenes disminuye a medida que disminuye el volumen del speckle. Es evidente de los resultados el aumento en el tamaño de los órdenes difractados a medida que se aumenta el diámetro de las aberturas (y por lo tanto disminuye notablemente el volumen de los speckles considerados) aumentando la dispersión en frecuencias de las redes de índices.

### 3. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el modelo de speckles volumétricos estudiado previamente para el caso de geometría de transmisión responde también a la situación de geometría de reflexión.

Se encontraron de este modo las condiciones experimentales de trabajo que permiten un registro eficiente. Debemos mencionar que el uso de un espejo adaptado frente al empleo de un divisor de haz convencional (50-50) aumenta en un 75% la energía disponible que llega al medio de almacenamiento favoreciendo un registro eficiente y contribuyendo a disminuir notablemente el tiempo de exposición, evitando los problemas asociados a las perturbaciones mecánicas.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de los siguientes subsidios: CONICET No. 5995, ANCYT PICT 12564 y 1167 y Facultad Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (Argentina). M. L. Molina, agradece al Centro de Investigaciones Ópticas-CIOp, La Plata, Argentina. Igualmente a COLCIENCIAS-BID Colombia, a la Universidad de Pamplona (Colombia) y a la Universidad Industrial de Santander (Colombia) por el apoyo financiero

### REFERENCIAS

1. M. Francon, *Laser Speckle and Applications in Optics*, Academic Press, New York, 1979.
2. R.K. Erf, *Speckle Metrology*, Academic Press, New York, 1978.
3. J.C. Dainty (Ed.), *Laser Speckle and Speckle Phenomena*, Springer-Verlag, Berlin, 1975.
4. H.J. Tiziani, K. Leonhardt, J. Klenk, *Real-time displacement and tilt analysis by a speckle technique using Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>-crystals* *Optics Communications* 34, pp. 327-331, 1980.
5. H.J. Tiziani, J. Klenk, *Vibration analysis by speckle techniques in real time* *Appl. Opt.* 20, pp. 1467-1470, 1981.
6. R. Tripathi, G.S. Pati, A. Kumar, K. Singh, *In-plane displacement measurement using a photorefractive speckle correlator*, *Optics Communications* 149, pp. 355-365, 1998.
7. H.J. Tiziani, *Optica Acta* 29, pp. 463, 1982.
8. M. Tebaldi, A. Lencina, N. Bolognini « Analysis and applications of the speckle patterns registered in a photorefractive BTO crystal » *Optics Communications*, 202, No. 6, pp. 257-270, 2002.
9. A. Salazar, M. Tebaldi, N. Bolognini, "Experimental study of volume speckle in four-wave mixing arrangement", *Optics Communications* 221, No. 4-6, pp. 249-256, 2003.
10. A. Salazar, M. Tebaldi, N. Bolognini, "Analysis of high frequency modulated speckle in a BSO crystal", *Optics Communications*, 223, No. 1-3, pp. 1-9, 2003.
11. A. Salazar, H. Lorduy, M. Tebaldi, N. Bolognini, "Analysis of reflection speckle holograms in a BSO crystal",

---

*Optics Communications*, 262, No 2, pp. 157-163, 2006.

12. M. Tebaldi, L. Angel Toro, M. C. Lasprilla, N. Bolognini, "Image multiplexing by speckle in BSO", *Optics Communication*, 155, pp. 342-350, 1998.

13. L. Angel, M. Tebaldi, M. Trivi, N. Bolognini, "Optical operations based on speckle modulation by using a photorefractive crystal", *Optics Communication*, 168, pp. 55-64, 1999.

14. M. Tebaldi, L. Angel Toro, M. Trivi, N. Bolognini, "Optical processing by fringed speckles registered in a BSO crystal", *Optical Engineering*, 39, No 12, pp. 3232-3238, 2000.