

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DIFRACCIÓN Y DE LA REFLECTIVIDAD DE CONJUGACIÓN DE FASE DE REGISTROS DE PATRONES DE SPECKLE DE FIBRA ÓPTICA EN CRISTALES BSO.

Jorge A. Gómez¹, Nelson Darío Gómez³, Ángel Salazar Martínez²

¹Grupo de Física Básica y Aplicada, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.

²Grupo de Óptica y Espectroscopía (GOE), Centro de Ciencia Básica, Universidad Pontificia Bolivariana, A.A. 56006, Medellín, Colombia

³Grupo de Investigación en Maquinas Inteligentes y Reconocimiento de Patrones, Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador - Medellín, Colombia

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento de la eficiencia de difracción y de la reflectividad de conjugación de fase, de patrones de speckle generados por fibras ópticas plásticas, y registrados en un cristal BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) mediante arreglos de mezcla de dos y cuatro ondas, respectivamente. En primera instancia, se ilustra la implementación de una técnica experimental que permite concluir que un patrón de speckle producido por una fibra óptica plástica que transporta radiación láser de 532nm tiene un comportamiento Gaussiano. Lo anterior permite aplicar en el análisis realizado, la estadística apropiada para patrones de speckle bien desarrollados (*fully developed speckle*). A través del análisis de las imágenes difractadas y conjugadas en fase, se obtienen estimaciones indirectas del comportamiento de la eficiencia de difracción y de la reflectividad de conjugación de fase para los patrones de speckle registrados, lo que permite determinar su dependencia con respecto al tamaño del speckle en condiciones de modulación variable. Los resultados experimentales obtenidos, son contrastados con un modelo simplificado en el que la longitud del grano de speckle y la modulación promedio cambian simultáneamente, encontrando muy buenos ajustes con las formas funcionales de la ED y de RCF experimentales. El comportamiento de la ED y de la RCF demostrado en éste trabajo, es de gran utilidad en el desarrollo e implementación de sistemas de metrología holográfica de speckle.

Palabras clave: *Eficiencia de Difracción, Reflectividad de Conjugación de Fase, Speckle, Cristales BSO*

Recibido: 15 de Septiembre de 2011. Aceptado: 12 de Diciembre de 2011

Received: September 15th, 2011. Accepted: December 12th, 2011

ANALYSIS OF DIFFRACTION EFFICIENCY AND PHASE CONJUGATION REFLECTIVITY OF REGISTERS OF FIBER SPECKLE PATTERNS REGISTERED ON BSO CRYSTALS

ABSTRACT

In this work, the behavior of the diffraction efficiency (DE) and the phase conjugation reflectivity (PCR) of speckle patterns generated by plastic optical fibers and recorded in BSO photorefractive crystals by two and four wave-mixing arrangements is analyzed. As a first step, an experimental technique which allows demonstrating that a speckle pattern produced by a plastic optical fiber transporting laser radiation of 532nm has a Gaussian behavior is implemented, which in turn, allows modifying the average dimensions of a speckle grain by changing slightly the output pupil aperture used to obtain subjective speckle. Throughout the analysis of diffracted and phase conjugated images, estimations of diffraction efficiency and phase conjugation reflectivity were calculated, which allowed identifying their dependence with the speckle size in a non-constant modulation condition. Experimental results were compared with a simplified model where both the modulation and the speckle size change simultaneously and, very good results were observed. The behavior of the DE and PCR presented in this work are very useful in the implementation of holographic speckle metrology arrangements.

Keywords: *Diffraction Efficiency, Phase Conjugation Reflectivity, Fiber Speckle, BSO Crystals.*

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales fotorrefractivos, son materiales que han sido ampliamente estudiados por sus potenciales aplicaciones en diversas áreas de la óptica, tales como, amplificación de señales, holografía dinámica, conjugación de fase, procesamiento y almacenamiento de imágenes, y en general aplicaciones en donde las características de reutilización del medio son importantes [1-4].

Una de las principales ventajas de los materiales fotorrefractivos sobre los medios de grabación convencionales, reside en la posibilidad de registrar información volumétrica; así, cada punto del material se convierte en un elemento de registro vía efecto electro-óptico [5]. En este sentido, es bien sabido que un patrón de speckle es una distribución no uniforme de luz con características volumétricas, las cuales, pueden ser modificadas mediante la variación de parámetros experimentales de un esquema de speckle subjetivo [6], es decir, mediante la manipulación de la pupila de salida del sistema, de la longitud de onda de trabajo, ó de la distancia imagen del sistema óptico. De esta forma, para el registro de las características volumétricas de los granos de speckle, para la identificación de cambios en su estructura tridimensional, y por ende, para el aprovechamiento de estas posibilidades en sistemas de ingeniería, los materiales fotorrefractivos ofrecen condiciones ideales.

Entre los cristales fotorrefractivos más estudiados en la actualidad, están los de la familia de las silenitas. Esta familia de cristales, tiene como características principales, una alta sensibilidad y tiempos de respuesta a la radiación muy cortos, lo que viabiliza su utilización en aplicaciones donde el requerimiento de tiempo real es del orden de los milisegundos y en donde se utilicen fuentes de luz con bajas potencias ópticas [7].

En trabajos previos, se ha analizado el comportamiento de la eficiencia de difracción (ED) y de la reflectividad de conjugación de fase (RCF) en arreglos holográficos de patrones de speckle generados mediante un difusor simple. En esos trabajos se lograron condiciones experimentales que garantizaban modulación y relación de prueba constantes para los arreglos de mezcla de dos y cuatro ondas respectivamente, encontrando un efecto directo de la longitud promedio del grano de speckle sobre la ED y la RCF [8-9]. Más

recientemente, demostramos la posibilidad de mejorar las condiciones metrológicas de un sistema de medición de micro-desplazamientos basado en el patrón de speckle producido por una fibra óptica plástica (FOP). En estos casos, se supuso que el comportamiento del patrón de speckle producido por la fibra óptica obedecía una estadística Gaussiana y se previó un comportamiento decreciente de la ED y de la RCF cuando la pupila de salida del sistema era aumentada sin controlar las intensidades [1-2]. En estos últimos trabajos, a pesar de que se evidenció el descenso del contraste de las imágenes difractadas y conjugadas en fase cuando el tamaño de la pupila aumentaba, lo cual modificaba simultáneamente el tamaño del speckle y las relaciones de intensidad, no se incorporaron técnicas que permitieran evaluar experimentalmente el comportamiento de la ED y de la RCF. Adicionalmente, no se realizó un análisis que permitiera corroborar la presunción de comportamiento Gaussiano para el speckle producido por la FOP. En éste trabajo, en primera instancia, se ilustra una técnica que permite mostrar que el patrón de speckle producido por una fibra óptica plástica estándar en la que se inserta radiación láser de 532nm, obedece una estadística Gaussiana. Posteriormente, y a través del procesamiento de las imágenes difractadas y conjugadas en fase, se evalúa el comportamiento de la ED y de la RCF cuando mediante la modificación de la pupila de salida de un esquema de speckle subjetivo, se varía simultáneamente la longitud del grano de speckle y la modulación promedio para los procesos de mezclado de ondas. Los resultados experimentales, están en total concordancia con las predicciones teóricas propuestas mediante un modelo simplificado basado en cantidades promedio.

2. ANALISIS TEORICO Y EXPERIMENTAL

En general, un patrón de speckle puede ser expresado matemáticamente como la suma de fasores aleatorios como,

$$\mathbf{A} = A e^{j\theta} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{j\phi_n} \quad (1)$$

Donde N representa el número de fasores, \mathbf{A} representa el fasor resultante, A representa la amplitud de \mathbf{A} y θ su fase; a_n y ϕ_n representan la amplitud y la fase de la n -ésima componente de

la suma. Si en un patrón de éste tipo, a_n y ϕ_n son cantidades estadísticamente independientes en cada fasor, si la distribución de ϕ_n es uniforme en el intervalo $(-\pi, \pi)$, y si el número de fasores en la suma es elevado, la función de densidad de probabilidad para la intensidad tiene un comportamiento exponencial negativo dado por,

$$P_I(I) = \frac{1}{I} e^{-\frac{I}{I}} \quad (2)$$

Un patrón de speckle con estas características es conocido en la literatura como un “fully developed speckle” ó “un speckle bien comportado o desarrollado”.

En las referencias [1-2], se consideró que por el elevado número de modos que soporta una fibra óptica plástica cuando radiación de 532nm viaja a través de ella, el comportamiento del patrón de speckle era similar al de un speckle bien comportado. Sin embargo, no se desarrolló ninguna técnica teórica y/o experimental que constatará dicha suposición.

En éste trabajo, y para demostrar la validez de un modelo Gaussiano para el patrón de speckle producido por una fibra óptica plástica, se implementó el algoritmo de reconstrucción de fase propuesto por *Denisenko et al* [10] y se calculó, a partir de las imágenes de los patrones de speckle, el histograma de intensidad. En la Fig. 1, se presenta el esquema experimental para la determinación de la fase. En éste esquema, mediante un divisor de haz B/S1, la radiación lumínica de una fuente láser de 532nm se divide en dos haces. Con la luz de uno de los brazos se genera una onda plana, mientras que en el otro brazo, la luz es insertada en 50cm de una FOP. El patrón de speckle que se forma a la salida de la fibra y la onda plana, con polarizaciones ortogonales, son superpuestos mediante un segundo divisor de haz B/S2 formando un interferómetro de Mach-Zehnder, y llevado la salida a un sistema analizador compuesto por una lámina de cuarto de onda y por un polarizador lineal, ambos con posibilidad de rotación. De ésta forma y de la definición de los parámetros de Stokes [11], es posible calcular la diferencia de fase entre la onda plana y el patrón de speckle como:

$$\delta = \tan^{-1}(S_3 / S_2) \quad (3)$$

$$S_2 = I(45,45) - I(135,135)$$

$$S_3 = I(45,0) - I(135,0)$$

Donde $I(\alpha, \beta)$ es la intensidad medida por la cámara CCD cuando en el analizador de la Fig.1, el polarizador es girado un ángulo α y la lámina de cuarto de onda es girada un ángulo β , respecto de la dirección horizontal.

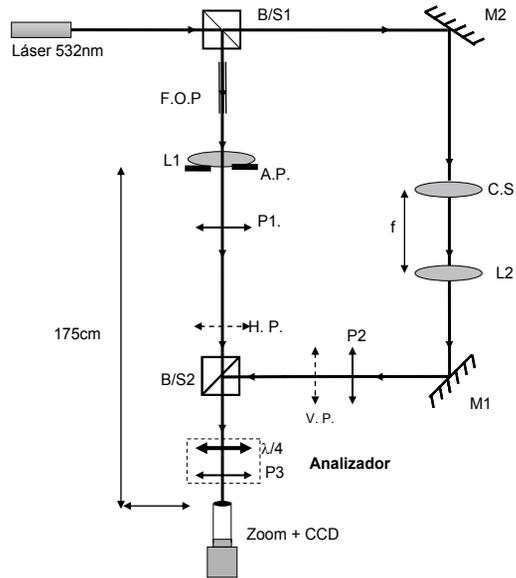


Fig. 1 Diagrama Experimental. B/S1 y B/S2: Divisores de haz D: Difusor, M1 y M2: Espejos, A.P: Pupila de salida, $\lambda/4$: Lámina de cuarto de onda, P1 y P2: Polarizadores, L1 y L2: Lentes. C.S: Sistema de Colimación

En la Fig. 2 se muestra la imagen del patrón de speckle producido por la FOP, la distribución de fase, el histograma de fase y el histograma de intensidades. De ésta figura es evidente que la distribución de fase es bastante uniforme en el intervalo $(-\pi, \pi)$, más aún, que la distribución de intensidades obedece a una distribución exponencial negativa. Esto corrobora que la suposición de que el patrón de speckle producido por una FOP en las condiciones experimentales de las referencias [1-2] es un speckle bien comportado.

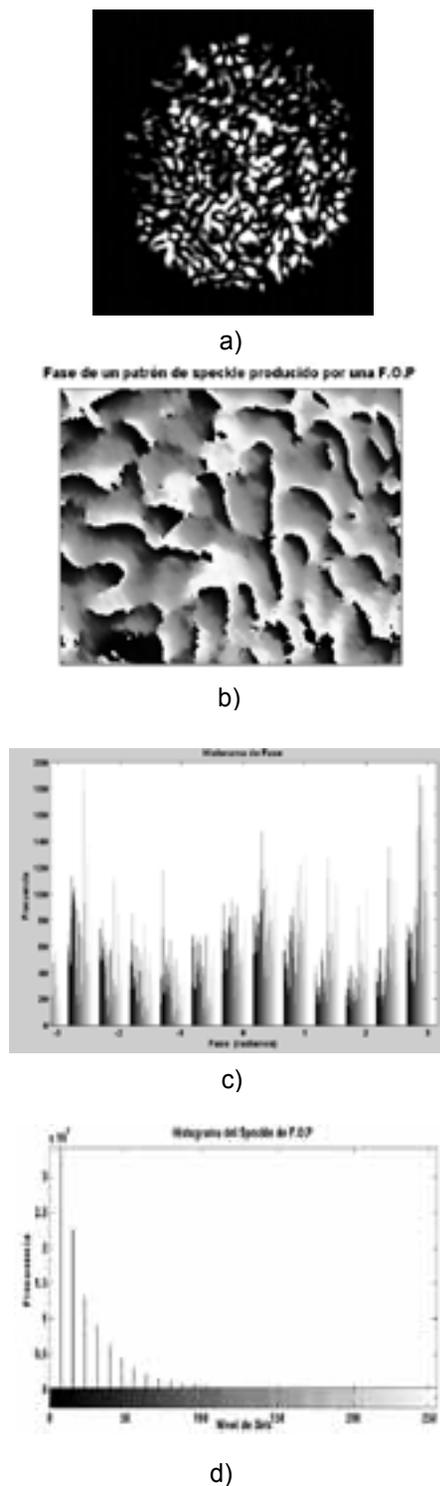


Fig. 2. Análisis de un patrón de speckle generado por una FOP. a) Speckle; b) Distribución de fase; c) Histograma de fase; d) Histograma de intensidades de la imagen a).

Un esquema de speckle subjetivo se muestra en la Fig.3. En este tipo de arreglos lo que se registra, cualquiera sea el material de grabación, es la imagen del elemento dispersor, en nuestro caso el speckle generado por la FOP. En el caso en el que el patrón de speckle sea bien comportado, se puede entender cada grano de speckle como un pequeño cilindro de luz con diámetro y longitud promedio dados respectivamente por [6],

$$\langle D_S \rangle = \lambda \left(\frac{Z}{D} \right) \quad (4)$$

$$\langle L_S \rangle = \lambda \left(\frac{Z}{D} \right)^2$$

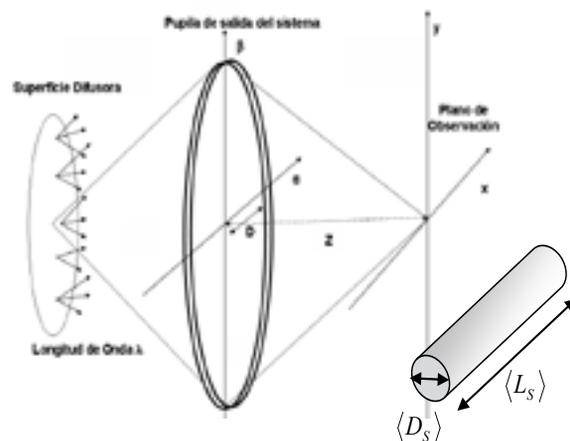


Fig. 3. Esquema de speckle subjetivo

Después de demostrar un comportamiento Gaussiano para el speckle de nuestro experimento, se tomaron imágenes de la lectura de los patrones de speckle difractados en un arreglo de mezcla de dos ondas como el que se presenta en la Fig. 4.

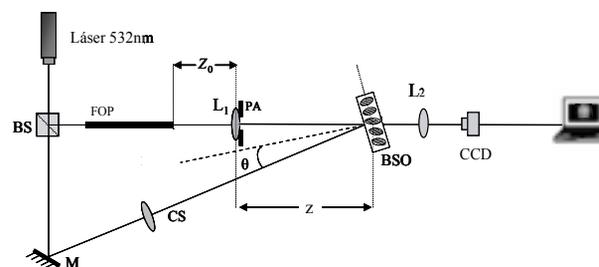


Fig. 4. Diagrama del esquema experimental del sistema de mezcla de dos ondas. FOP: Fibra óptica plástica, PA: Pupila de salida del sistema formador de imágenes, CS: Sistema colimador, L1 y L2: Lentes, B/S: Divisor de haz, M: Espejo, BSO: Cristal fotorrefractivo BSO de 10mm×10mm×10mm.

Para un sistema de speckle modulados con alta frecuencia mediante un arreglo de mezcla de dos ondas, la eficiencia de difracción se puede calcular a partir de la expresión de Kogelnik como [8]:

$$\eta = \sin^2(kL_S) \quad (5)$$

Donde L_S es la longitud promedio de cada grano de speckle, la cual está dada por la ecuación (4) y, κ es la constante de acoplamiento del sistema que puede escribirse como:

$$k = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_o \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (6)$$

Donde θ es el ángulo entre haces afuera del cristal, n es el índice de refracción del cristal a la longitud de onda de trabajo λ_o , y Δn es la profundidad de la modulación de índice. La expresión explícita para Δn en un régimen de difusión (sin campo eléctrico externo aplicado al cristal) es [8]:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 r_{41} \left\{ m \frac{E_D E_q}{(E_q + E_D)} \right\} \quad (7)$$

donde r_{41} es el coeficiente electro-óptico para el BSO, $m = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ es la modulación promedio del patrón de luz, I_1 e I_2 son las intensidades promedio de los haces de referencia y de speckle, respectivamente, $E_D = K k_B T / q$ es el campo de difusión, $K = 2\pi / \Lambda$ es la magnitud del vector \vec{K} de la red fotorrefractiva, y $\Lambda = \lambda_o / 2 \sin \theta$ es el periodo de red, k_B es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta, y q es la magnitud de la carga del electrón, $E_q = q N_A / \epsilon_o \epsilon K$ es el campo de carga espacial de saturación, N_A es la densidad de aceptores, ϵ_o es la permitividad del vacío, y ϵ es la permitividad del material. En nuestro experimento la expresión (5) fue evaluada con los siguientes parámetros experimentales y del material, $\theta = 13.8^\circ$, $z_c = 375 \text{mm}$, $n = 2.65$, $T = 293 \text{K}$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $N_A = 0.95 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$, $\epsilon = 56 \epsilon_o$, $\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$.

En estudios previos de mezcla de dos ondas con patrones de speckle [8] se ha mostrado que, cuando se mantiene la modulación constante, la ED. crece si se aumenta la longitud promedio del speckle; así mismo, si no se modifica la longitud promedio del speckle y la modulación aumenta, la ED. también crece. En la referencia [1], se mostró que en un arreglo holográfico de mezcla de dos ondas, cuando la pupila se cierra sin control de la intensidad, y a pesar del descenso de la modulación del patrón de luz debido a que la intensidad I_2 es menor que la inicial, el contraste de las imágenes difractadas aumenta, lo que permite implementar una estrategia para el mejoramiento del rango dinámico de un sensor de micro-desplazamientos. En éste caso, y cuando se cierra un poco el tamaño de la pupila del sistema de la Fig. 4 aparece un efecto combinado. Por un lado, la ED debería crecer por el aumento de la longitud promedio del speckle, pero simultáneamente, ésta acción haría que la ED decreciera por la disminución de la modulación del patrón de speckle. En [1] sólo se examinó visualmente el aumento del contraste de los patrones, pero no se incluyó ninguna estrategia que permitiera evaluar el comportamiento de la ED.

Si consideramos la intensidad de un patrón de speckle uniformemente distribuida en toda la sección transversal de la pupila de salida del sistema, y si se tiene una intensidad I_0 cuando la pupila tiene un diámetro D , el cual, corresponde a la máxima apertura que permite ésta suposición; entonces para diámetros de pupilas $r < D$ la intensidad del patrón de speckle puede ser expresada para cualquier r como,

$$I(r) = I_0 \frac{r^2}{D^2} \quad (8)$$

De la misma forma si evaluamos la longitud promedio de cada grano de speckle para cada tamaño de pupila r , tendríamos,

$$L_S(r) = \lambda \left(\frac{Z}{r} \right)^2 \quad (9)$$

Incluyendo simultáneamente (8) y (9) en las expresiones (5), (6), y (7), se obtiene el comportamiento decreciente que se presenta en la Fig. 5 mediante una línea continua. Este efecto predice que en un amplio rango de trabajo aparecerá un incremento de la ED cuando se cierra

la pupila de salida del sistema, como consecuencia de un aumento en la longitud del grano de speckle, y a pesar de que la modulación promedio se reduce simultáneamente. En la Fig. 6 se presentan patrones difractados para diferentes tamaños de pupila.

Por definición, en un esquema de mezcla de ondas, la ED es la razón entre la intensidad difractada I_D y la intensidad de la onda plana de lectura. En nuestro caso, la intensidad difractada es función del diámetro de la pupila de salida del sistema, mientras que la intensidad de lectura es constante, por lo tanto:

$$\eta(r) = \frac{I_D(r)}{I_1} \quad (10)$$

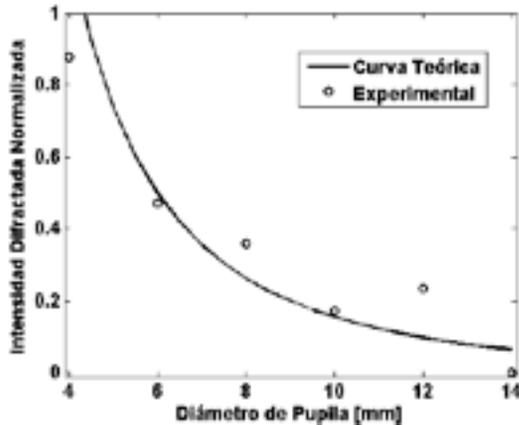
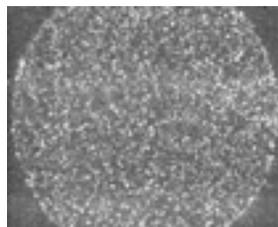
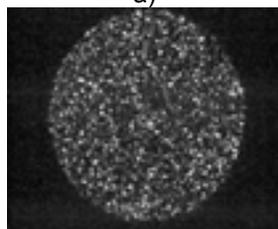


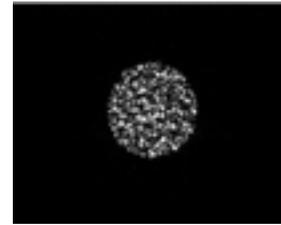
Fig. 5. Comportamiento de la intensidad difractada vs diámetro de pupila.



a)



b)



c)

Fig. 6. Lectura de patrones de speckle con diferentes tamaños de pupila. a) 14mm; b) 10mm; c) 4mm

De la expresión (10), es claro que cuando se modifica el diámetro de la pupila de salida del sistema, la intensidad incidente de la onda plana de referencia no se modifica, por lo tanto, si se hace una estimación de la intensidad difractada por el sistema de mezcla de ondas, es posible construir el comportamiento funcional de la ED. Para la evaluación de las intensidades difractadas, se desarrolló un proceso de calibración de la cámara CCD que permitió un comportamiento lineal en un amplio rango de niveles de gris, y se implementó un algoritmo que permitió realizar la suma algebraica de la intensidad de cada punto de la imagen. La forma funcional normalizada de los resultados de dicha suma se contrastó con la forma funcional de la curva teórica. En la Fig. 5, los datos experimentales se superponen con la predicción teórica. De ésta figura se evidencia un comportamiento de gran importancia física, ya que como se comentó anteriormente, el efecto combinado del aumento del tamaño del speckle y de la reducción de la modulación nos muestra una preponderancia del tamaño del speckle sobre la modulación en un amplio rango de trabajo, lo que demuestra gran potencialidad en aplicaciones metrológicas.

De la misma forma en la que se evaluó el comportamiento de la ED, en los sistemas de mezcla de dos ondas; se evaluó el comportamiento de la RCF en arreglos de mezcla de cuatro ondas.

En la Fig. 7 se presenta el arreglo experimental de mezcla de cuatro ondas que permitió adquirir los patrones conjugados en fase. Cuando se incluye un comportamiento combinado como el descrito con las ecuaciones (8) y (9), y usando el formalismo presentado en la ref. [9], del cálculo de la RCF se obtiene la forma funcional que se presenta en la Fig. 8 con una línea continua.

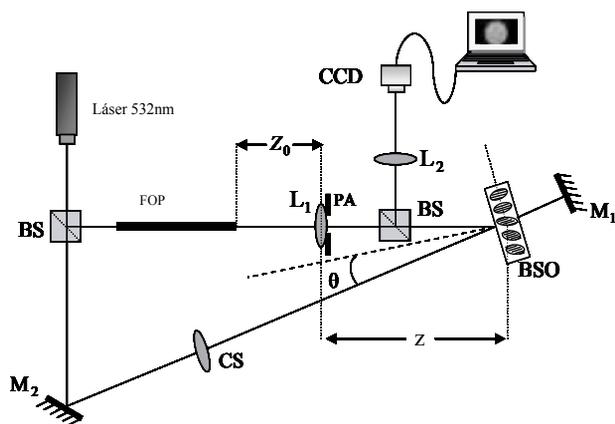


Fig. 7 Diagrama del esquema experimental de la mezcla de cuatro ondas. FOP: Fibra óptica plástica, PA: Pupila de salida del sistema formador de imágenes, CS: Sistema colimador, L1 y L2: Lentes, B/S: Divisor de haz, M: Espejo, BSO: Cristal fotorrefractivo BSO de 10mm×10mm×10mm.

De la misma forma que en el caso de la mezcla de dos ondas, cuando en el proceso de mezcla de cuatro ondas se cierra la pupila de salida del sistema, se supone un efecto contrario y combinado, es decir; si la relación de prueba del mezclado disminuye, la RCF tiende a decrecer, mientras que si el tamaño del grano de speckle aumenta la RCF tiende a aumentar [9]. En la mezcla de cuatro ondas, la RCF es la razón entre la intensidad de la onda conjugada en fase I_{CF} y la intensidad del patrón e speckle que proviene de la fibra y que se mezcla en el cristal I_{SP} . En ésta caso, ambas cantidades dependen del área de la pupila de salida del sistema y éste efecto es tenido en cuenta en el cálculo que conduce a la predicción teórica.

Es de anotar que las intensidades de las ondas conjugadas en fase suelen ser menores que las intensidades de las ondas difractadas en el proceso de mezcla de dos ondas.

Similarmente que en el caso de dos ondas, en éste caso, se obtuvieron patrones conjugados en fase, mostrando que en un amplio rango de diámetros de pupila el contraste de las imágenes aumentó a pesar de no tener control de las intensidades en la mezcla.

En la Fig. 9 se muestran patrones conjugados en fase para diferentes diámetros de pupila. De la misma forma, que en el caso de dos ondas, se construyó evaluando la intensidad de la onda conjugada en fase, un comportamiento funcional de

la RCF. Con éste fin, se realizó el mismo proceso de suma punto a punto que se describió para el caso anterior, y se contrastaron los resultados con el comportamiento predicho teóricamente.

En la figura 8 se muestran los resultados experimentales en contraste con el modelo teórico.

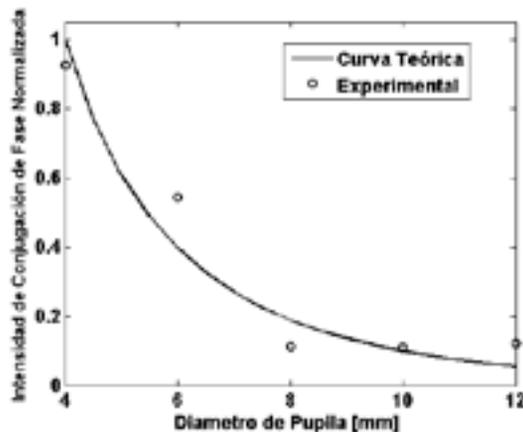


Fig. 8. Comportamiento de la intensidad de los patrones conjugados en fase vs diámetro de pupila.

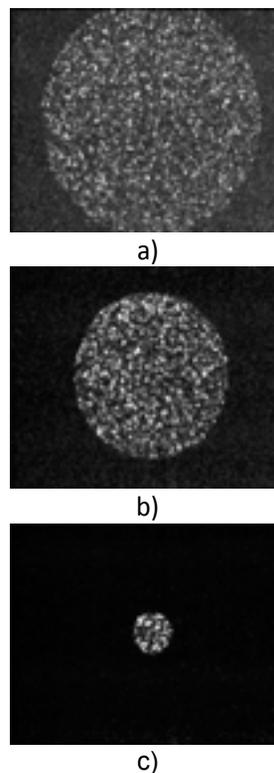


Fig. 9. Patrones conjugados en fase con diferentes tamaños de pupila. a) 12mm; b) 8mm; c) 2mm

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se validaron el uso de los modelos teóricos considerados en las referencias [1-2] para la eficiencia de difracción ED y para la reflectividad de conjugación de fase RCF de patrones de speckle de fibra registrados en un material fotorrefractivo. Se implementó una estrategia para la recuperación de la fase y del histograma de intensidades de los patrones de speckle producidos por una fibra óptica plástica. Con los resultados obtenidos se validó experimentalmente la suposición de comportamiento Gaussiano para dichos patrones asumida en [1-2]. A partir de las imágenes de los patrones de difracción y de conjugación de fase, se estimó el comportamiento funcional de la ED y de la RCF en términos del tamaño de pupila, o lo que es lo mismo, en términos de la longitud del grano de speckle. Para esto se desarrolló una estrategia numérica de suma píxel a píxel de la intensidad de los patrones obtenidos, corroborando que las suposiciones teóricas de las referencias [1-2] son completamente apropiadas, y que pueden ser aplicadas a un gran rango de aplicaciones metrológicas en donde la estructura volumétrica de los patrones de speckle de fibra sea de interés.

4. AGRADECIMIENTOS

J. A Gómez agradece el soporte financiero del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid para sus estudios doctorales y para el desarrollo del proyecto de investigación 2061090125. A Salazar agradece el apoyo del Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación, CIDI, de la Universidad Pontificia Bolivariana, a través del proyecto de investigación 635A-02/10-27. N. Gómez agradece el apoyo del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. A. Gómez, H. Lorduy, and Ángel Salazar, "Improvement of the dynamic range of a fiber specklegram sensor based on volume speckle recording in photorefractive materials", *Opt. Las. Eng.*, 49, 473-480, (2011)

[2] J. A. Gómez, H. Lorduy, and Ángel Salazar, "Influence of the volume speckle on fiber specklegram sensors based on four-wave mixing in

photorefractive materials", *Opt. Commun.*, 284, 1008-1014, (2011)

[3] Gasvik. Kjell. *Optical Metrology*. (John Wiley & Sons. West. Sussex. 2002).

[4] P. Gunter, J. P. Huignard. *Photorefractive Materials and their Applications*. (Springer, New York, 2007).

[5] I. de Oliveira, J. Frejlich, "Diffraction efficiency measurement in photorefractive thick volume holograms" *J. Opt. A: Pure Appl.*, 5, 428-434, 2003.

[6] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics*. (Roberts and Company, Englewood, Colorado, 2007).

[7] A. Marrakchi, R. V. Johnson, and A. R. Tanguay, Jr., "Polarization properties of photorefractive diffraction in electrooptic and optically active sillenite crystals (Bragg regime)", *J. Opt. Soc. Am. B*, 3, 321-336, (1986).

[8] A. Salazar, M. Tebaldi, N. Bolognini, "Analysis of high frequency modulated speckle in a BSO crystal", *Opt. Commun.*, 223, 1-9, (2003).

[9] A. Salazar, M. Tebaldi, N. Bolognini, "Experimental study of volume speckle in four wave mixing arrangement", *Opt. Commun.*, Vol. 221, 249-256, (2003).

[10] V. G. Denisenko, A. Minovich, A. S. Desyatnikov, W. Krolikowski, M. S. Soskin, Y. S. Kivshar, "Mapping phases of singular scalar light fields", *Opt. Lett.*, 33, 89-91, (2008)

[11] B. Schaefer, E. Collett, R. Smyth, D. Barrett, "Measuring the Stokes polarization parameters" *Am. J. Phys.* 75, 163-168, (2007).