

Medida de la eficiencia de difracción fotorrefractiva como función del vector onda de la red en un cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ **Measurement of photorefractive diffraction efficiency as a function of wave vector of the network in a crystal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$** **Martha Lucía Molina Prado¹, Vladimir Jerez², María del C. Lasprilla³**¹ Grupo de Óptica Moderna (GOM), Departamento de Física y Geología, Universidad de Pamplona.² Grupo de Investigación en Tecnologías de Información GITI. Universidad Cooperativa de Colombia. Bucaramanga. Colombia³ Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) - Universidad Industrial de Santander**RESUMEN**

Se analiza el comportamiento experimental de la eficiencia de difracción de un registro holográfico en cristales fotorrefractivos silenitas. En particular, los cristales fotorrefractivos (PRCs) son ampliamente usados para el registro holográfico debido a que en ellos se puede registrar y borrar con alta sensibilidad. El estudio tiene en cuenta las mejores condiciones experimentales para la obtención de un registro holográfico eficiente. Para el registro se usa un láser de He-Ne. Es importante relacionar la eficiencia de difracción con la variación del ángulo de registro y la frecuencia espacial de la red en la condición de Bragg. Estos resultados son presentados en curvas que relacionan la eficiencia de difracción con el vector de red. Se obtuvieron las condiciones apropiadas para el mejor registro holográfico con los cristales mencionados (BTO). Encontramos que el mejoramiento en la eficiencia de difracción depende de la manera como se registra la red, es decir, el ángulo de registro para una longitud de onda determinada.

Palabras clave: Eficiencia de Difracción, Cristales Fotorrefractivos.**ABSTRACT**

The diffraction efficiency of the holographic recording in photorefractive sillenite crystals is analyzed. In particular, photorefractive crystals (PRCs) are widely used for holographic recording because they can be recorded and erased in this media with sufficiently high sensitivity. The study it takes into account the best experimental conditions for the obtaining of an efficient holographic recording. For the recording are used a laser source of He-Ne. It is important to relate the efficiency diffraction with the variation in the recording angle and frequency spatial of grating inside the condition of Bragg. These results are presented in curves that relate the efficiency diffraction with the recording angle. The appropriate conditions for the best holographic recording with the photorefractive crystal (BTO) mentioned are obtained. We found that the enhancement of the diffraction efficiency depends on the way the grating is recorded, that is to say, recording angle of a wavelength determined.

Keywords: Diffraction efficiency, photorefractive crystals.

Para citar este artículo: Molina Prado ML, Jerez V, Lasprilla MC. Medida de la eficiencia de difracción fotorrefractiva como función del vector onda de la red en un cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

.Bistua .2011;9(2):43-47

+Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de separatas: Martha Lucía Molina Prado. Departamento de Física y Geología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Pamplona.email:molinaprado@gmail.com

44

Introducción

Los materiales fotorrefractivos son ampliamente usados como medios de registros holográficos, para computación óptica y almacenamiento óptico de datos [1]. Esto debido a que pueden registrar hologramas de volumen con alta sensibilidad y sin la necesidad de procesos de revelado. En comparación con otros cristales de la familia silenita, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) y $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO), los cristales $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) exhibe poca actividad óptica y son mas sensibles a la longitud de onda del rojo, siendo potencialmente atractivos para aplicaciones empleando fuentes de luz de bajo costo como láseres semiconductores o de HeNe.

La eficiencia de difracción de redes holográficas en cristales fotorrefractivos ha sido calculada en muchas investigaciones para condiciones de lectura On-Bragg [2-5] y off-Bragg [6-8]. En los cristales fotorrefractivos, la iluminación periódica incidente, redistribuye las cargas y crea un campo de cargas espaciales modulando así el índice de refracción del cristal a través del efecto electro-óptico. Sin embargo, la sensibilidad de los cristales, es decir, el cambio en el índice de refracción por absorción de la luz, es muy pequeño. Por lo tanto muchas investigaciones se han focalizado en optimizar las propiedades del cristal y el descubrimiento de nuevos materiales fotorrefractivos.

Nuestros cálculos se realizan en tres pasos: Primero, se resuelven las ecuaciones del material, calculando así el campo de cargas espaciales. Segundo, se encuentra la variación del índice de refracción del material resultante de la interferencia entre dos haces por medio del efecto electro-óptico. Y finalmente, se determina la eficiencia de difracción como función de la variación de las redes registradas en condición de Bragg.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

El efecto fotorrefractivo es un fenómeno caracterizado por un cambio local del índice de refracción de un material electro-óptico y fotoconductor, ocasionado por la iluminación del material mediante un haz de intensidad no uniforme. El efecto fotorrefractivo es debido a la migración de los portadores de carga, los cuales son atrapados. Dentro del cristal se genera un campo eléctrico de carga espacial, el cual modula el índice de refracción a través del efecto electro-óptico. En ausencia de campo eléctrico externo, el mecanismo responsable del transporte de cargas para el registro de hologramas de altas frecuencias en el cristal

BTO, es el proceso de difusión, lo cual significa que la fase de red es aumentada en $\pi/2$ con respecto a la del patrón de interferencia incidente.

Consideraremos una red registrada en el material producto de la incidencia de dos ondas planas de intensidad I_1 e I_2 , con vectores de onda k_1 y k_2 respectivamente, Fig.1. Estas ondas inciden simétricamente, con un ángulo θ_0 , formando un patrón de interferencia sobre el cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ descrito por:

$$I = I_0(1 + m \cos Kx) \quad (1)$$

Donde $K = (4\pi \sin\theta_0 / \lambda)$ es el vector de onda de la red registrada, λ es la longitud de onda de los haces incidentes, $m = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ es la modulación de la luz sobre la superficie del cristal. $I_0 = I_1 + I_2$, es la intensidad total. La respuesta física del material al patrón de interferencia es la creación de un campo de carga espacial E_{sc} el cual es descrito por las ecuaciones de Kukhtarev [9].

En el caso de la existencia de la conductividad de los portadores solo por proceso de difusión, la amplitud del campo de carga espacial es

$$E_{ce} = E_D m. \quad E_D \text{ es el campo de difusión}$$

$$E_D = \frac{K_B T}{e} K \quad (2)$$

Donde K_B es la constante de Boltzman, T es la temperatura y e es la carga del electrón.

E_{ce} se obtiene como una función de x y finalmente se calcula la variación de la amplitud del índice de refracción a lo largo de x , la cual, a través del efecto electro-óptico Pockels para el cristal BTO es:

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{41} E_{ce}(x) \quad (3)$$

Donde n_0 es el valor medio del índice de refracción

en el material, r_{41} es el coeficiente electro-óptico y E_{ce} es el campo de carga espacial. De acuerdo a la teoría de Kogelnik la eficiencia de difracción para redes de transmisión está dada por [3]:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n L_z}{\lambda_R \cos\theta_0} \right) \quad (4)$$

Siendo L_z el espesor del cristal; λ_R la longitud de onda en el vacío del haz de lectura y θ_0 el valor del ángulo medio de registro dentro del cristal.

3. ARREGLO EXPERIMENTAL

La investigación es realizada con un cristal de bismuto de titanio ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$). La muestra usada tiene dos superficies pulidas (110), y las direcciones

de los bordes son $[001]$ $[\bar{1}\bar{1}0]$. Esta orientación produce altas eficiencias de difracción.

El tamaño de la superficie pulida del cristal BTO es 10.0 mm x 7.0 mm. El espesor del cristal es de 3.0 mm. Todas las medidas son realizadas manteniendo la temperatura a 27°C.

45

La Fig. 2, describe esquemáticamente el registro holográfico. El haz de un láser de HeNe, emitiendo en la línea de 632.8 nm es expandido y filtrado para colimar la luz. Se dividió el haz con un cubo divisor 50/50 dando lugar a dos haces. Los dos frentes de onda plana provenientes del láser de He-Ne, generan un patrón de interferencia sobre el cristal, y de esta manera se registra una frecuencia espacial determinada. Para investigar el efecto fotorefractivo, se registran redes holográficas de diferentes frecuencias espaciales en el cristal, debido a la interferencia de dos ondas planas incidentes ($\lambda = 632.8\text{nm}$). El registro de una frecuencia espacial dentro del cristal, se genera por la incidencia de los haces en el cristal con un ángulo θ_0 determinado. $\theta_0 = [0.09 \ 0.14 \ 0.17 \ 0.23 \ 0.26 \ 0.25 \ 0.44 \ 0.52 \ 0.61]\text{rad}$. La variación del ángulo implica la realización de un nuevo esquema experimental, es decir, un nuevo registro holográfico. Se realizaron varias medidas por cada ángulo θ_0 . El laser es expandido para asegurar una iluminación homogénea en la haces. El tiempo de escritura o registro holográfico de 5 minutos, es el mismo para cada uno de los registros y por cada ángulo θ_0 .

Después de realizar el registro holográfico, en el proceso de lectura el cristal se ilumina homogéneamente con un haz de menor intensidad y de la misma longitud de onda del haz de registro, utilizando para ello un atenuador. El haz de lectura es posicionado en el ángulo de Bragg (ángulo de registro). Finalmente se detecta la intensidad del haz de lectura incidente (I_i) y difractado (I_d) por el cristal, utilizando para la captura una cámara de digitalización de imágenes CCD. Este procedimiento es realizado para diferentes ángulos θ_0 , es decir, para cada una de las redes registradas en el cristal.

La eficiencia de difracción η es calculada como la razón entre la intensidad incidente y difractada del haz de lectura $\eta = I_d / I_i$.

La expresión teórica de la eficiencia de difracción, dependiente del ángulo de incidencia está dada por:

$$\eta = \text{sen}^2 \left(\frac{-2\pi^2 n_0^3 r_{41} m K_B T L_z}{e \lambda^2} \tan \theta_0 \right)$$

(5)

La eficiencia de difracción se incrementa a medida que el ángulo de registro crece, Fig. 3.

En la Fig. 3, se muestra el perfil de la imagen del haz difractado, capturada por la CCD (256 nivel de gris) a la salida del cristal para diferentes ángulos de registro en ausencia de voltaje externo aplicado.

Tabla 1. Valores de los parámetros físicos para el cristal BTO usados para el cálculo numérico en la solución de las ecuaciones del material (Photorefractive Materials and Their Applications 2, Peter Gunter and Jean-Pierre Huignard)

I_0	10 mW/cm ²
$\mathcal{E}$	47 (constante dieléctrica)
n	2.55 (índice de refracción)
r_{14}	5.17×10^{-12} m/V (coeficiente electro-óptico)
N_D	1025 m^{-3} (densidad de donores)
N_A	1022 m^{-3} (densidad de aceptores)
e	1.602×10^{-19} C (carga de electrón)
λ	632.8 nm (longitud de onda)
T	300 K (temperatura)
K_B	1.3807×10^{-23} J/K (constante de Boltzman)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En estas condiciones experimentales, las frecuencias espaciales están en el rango de 284 líneas/mm y 1810 líneas/mm. La eficiencia de difracción de un registro holográfico fotorefractivo se calcula como una función del vector de red (K). Los resultados mostrados en la Fig. 4, fueron obtenidos en ausencia de campo externo aplicado.

La Fig.4 muestra los datos experimentales (puntos) normalizados, con su correspondiente desviación estándar y la curva de ajuste teórica (línea sólida) usando la ec.(5) y los valores en la tabla 1.

Los datos experimentales (puntos) se obtienen normalizando cada imagen registrada en la CCD de 2⁸ bit, por 256.

Para ángulos θ_0 pequeños en donde el vector de red (K) es pequeño, el proceso de difusión no es predominante para el registro de la red en el cristal; resultando una baja eficiencia de difracción teniendo en cuenta que no existe presencia de campo externo, manteniendo el tiempo constante en la etapa de registro. Vectores de red pequeños (K) implican períodos espaciales grandes Λ , por lo tanto, la eficiencia de difracción es pequeña.

La eficiencia de difracción se incrementa a medida que aumenta el ángulo θ_0 , es decir, para frecuencias espaciales grandes o períodos de red Λ

pequeños. Lo anterior implica que el proceso de difusión impera en la formación de la red. En el proceso de lectura, en condición On-Bragg, la red registrada en el cristal con período espacial Λ pequeño, aumenta la eficiencia de difracción.

46

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de COLCIENCIAS, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Pamplona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gunter and J.-P. Huignard. (1989), Photorefractive Materials and Their Applications. Springer Verlag, Vol. 2. Berlín.
- [2] H. Kogelnik, (1969), Coupled wave theory for thick hologram gratings. Bell Syst. Tech. J. 48, 2909.
- [3] L. Solymar, D. J. Webb y A. Grunnet-Jepsen. (1981), The physics and Applications of Photorefractive Materials. Clarendon Press-Oxford. London.
- [4] J.P. Huignard, (1977), Real time double exposure interferometry with BSO crystals in transverse electrooptic configuration. Applied Optic. Vol 16, 1807.
- [5] P. Yeh, (1993), Introduction to the nonlinear photorefractive optics. John Wiley & sons.
- [6] E.A. García, I. Casar, L.F. Magaña, (2002), Optics Communications. Vol 204. 363–369.
- [7] L.B. Au, L. Solymar. (1988), Space-charge field in photorefractive materials at large modulation. Optics Letters. 13, Issue 8. 660-662.
- [8] S.I. Stepanov. (1994), Applications of photorefractive crystals. Rep. Prog. Phys. Vol 57, 39-116.
- [9] N.V. Kukhtarev, V. Markov, S.G. Odulov, M.S. Soskin, V.L. Vinetskii. (1979), Ferroelectrics 22, 949

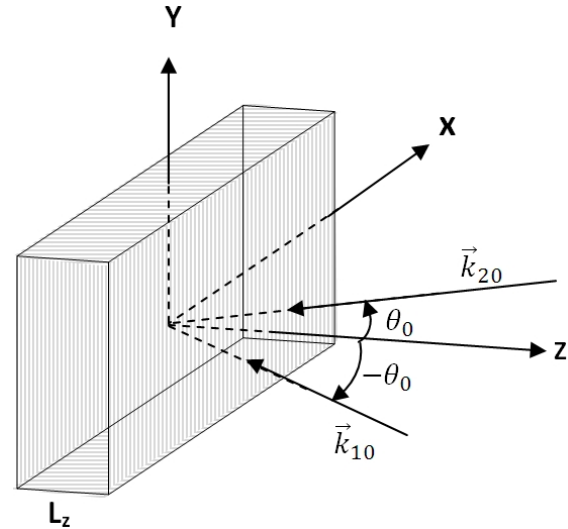


Fig.1 Esquema de un registro holográfico.

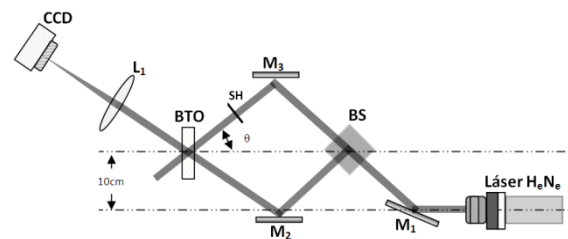
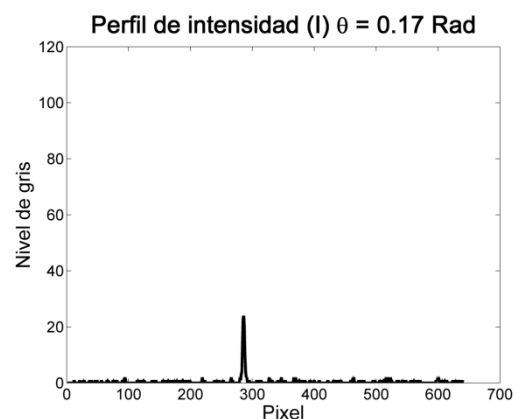


Fig.2 Esquema experimental holográfico: L_1 , lente; M_1 , M_2 , y M_3 , espejos; cámara CCD; SH, interruptor; y BTO cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$.



47

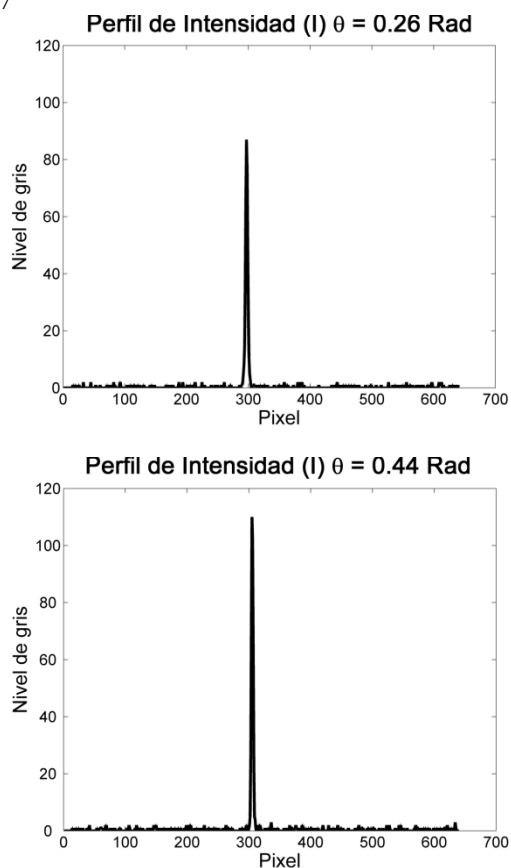


Fig.3 Perfiles del haz difractado para diferentes ángulos de registro, $\theta_0 = [0.17 \ 0.26 \ 0.44]$ Rad ; y sus vectores de red correspondientes $K = [3.35 \ 5.10 \ 8.45] \times 10^6 \text{ m}^{-1}$; en ausencia de campo eléctrico externo.

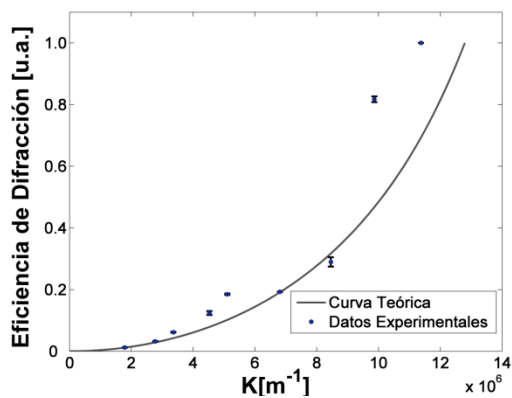


Fig.4 Curvateórica (línea sólida) para la eficiencia de difracción fotorefractiva como función del vector de red, en la longitud de onda de 632.8 nm y sus