



Eficiencia de difracción del registro de speckle modulados generados a partir de superficies reflecto-difusoras

Molina Martha ¹, Tebaldi Myrian ², Bolognini Néstor ^{2,3}

¹ Grupo de Óptica Moderna (GOM), Universidad de Pamplona, Colombia.

² 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.

³ Facultad Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Resumen

En este trabajo se amplía el estudio de difracción de los registros de patrones de *speckle* modulados generados por superficies reflecto-difusoras en medios fotorrefractivos, se investiga la influencia de la aplicación de un campo eléctrico externo y la relevancia de la orientación relativa de este campo respecto a la dirección de las redes de índices que modulan los *speckle* individuales, es decir, la orientación de las pupilas. Además se definen los parámetros a ser seleccionados, en términos de lograr un compromiso que mantenga buenos valores de eficiencia para realizar aplicaciones con este tipo de montaje experimental.

Palabras Clave: speckle modulado, cristales BSO

Diffraction efficiency of the recording modulated speckle of diffusing reflector surface

Abstract

In this paper extends the diffraction study of the recording modulated speckle patterns generated by diffusing reflectors surfaces in photorefractive crystals. The diffraction efficiency in terms of the application of an external electric field and the relative orientation of the field with respect a grating of indices which modulated speckle, ie the orientation of the pupils, are studied. Besides the parameters to be selected, in terms of achieving a compromise that maintains good efficiency values for applications of this experimental setup.

Keywords: modulated speckle, photorefractive crystals

Eficiência de difração modulada speckle gerado a partir de superfícies de difusão de reflectores

Resumo

Neste artigo estende a registros de difração de estudo modulados salpico padrões gerados por superfícies difusoras reflectores media fotorrefractivos, investigando a influência da aplicação de um campo eléctrico externo e a importância da orientação relativa do campo no que diz respeito os índices de endereço de rede que modulam salpico indivíduo, isto é, a orientação dos alunos. Além de definir os parâmetros a serem selecionados, em termos de obtenção de um compromisso que mantém bons valores de eficiência para aplicações de configuração, tais experimental.

Palavras-chave: speckle cristais modulados BSO



*Para citar este artículo: Molina M, Tebaldi M, Bolognini N. Eficiencia de difracción del registro de speckle modulados generados a partir de superficies reflecto-difusoras. Bistua.2012.10(2):50-60.

✚ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Molina Martha Grupo de Óptica Moderna (GOM), Universidad de Pamplona, Colombia. email: molinaprado@gmail.com

Recibido: Septiembre 16 de 2011 Aceptado: Octubre 10 de 2012

1.-Introducción

Cabe señalar que las distribuciones de *speckle* tienen naturaleza 3D. Entonces, esta naturaleza 3D debe ser tenida en cuenta cuando almacenamos en un medio de volumen. Esta característica fue confirmada teórica y experimentalmente pero analizando la eficiencia de difracción [1, 2] y la reflectividad de conjugación de fase de los *speckle* modulados 3D [3]; en un análisis comparativo con la holografía de volumen en geometría de transmisión En Refs. [1-4] se verificó la dependencia de la eficiencia de difracción con las características volumétricas del *speckle*. En ese sentido, en Refs. [5-6] 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, para objetos difusores de transmisión. En los trabajos previos de metrología *speckle* que involucran objetos difusores reflectantes, la geometría de registro presenta la limitación de una considerable pérdida de energía tanto de la fuente como del objeto difusor, dado que es usual emplear divisores de amplitud. Por ese motivo en el trabajo de Martha Molina et al. [8] se estudió el empleo de una alternativa al elemento divisor de amplitud. Luego, utilizando esta variante en el arreglo experimental, se analizó el registro y reconstrucción de *speckle* modulados generado por objeto reflecto-difusor, en condiciones de compromiso entre los diferentes parámetros de ajuste (diámetro D y separación de pupilas d , L_z =tamaño del cristal). Se comprueba 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 [1 - 7].

2.PROPIEDADES DEL REGISTRO FOTORREFRACTIVO DE LOS PATRONES DE SPECKLE MODULADOS CON BAJA FRECUENCIA DE UN OBJETO REFLECTO-DIFUSOR

2.1. Proceso de registro

El esquema experimental utilizado para el registro de *speckle* modulados de baja frecuencia de superficies reflecto-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 de la etapa de registro.

Para el proceso de registro en el cristal BSO, se emplea una longitud de onda proveniente de un láser Nd YAG doblado, continuo, que emite en 532 nm, con una potencia de 100 mW, debido a la alta sensibilidad del cristal en la región azul-verde del espectro; el cual 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 de distancia focal 260 mm, forma una imagen de la superficie difusora en el volumen del cristal fotorrefractivo. La distancia entre la lente y el cristal es $Z_c = 440\text{mm}$ y la distancia entre el difusor y la lente es $Z_0 = 636\text{mm}$. Esta selección de distancias se realiza con el fin de establecer un compromiso entre el tamaño del objeto, el cristal y del *speckle* dentro del cristal. Se utiliza un cristal con $L_x = L_y = L_z = 10\text{mm}$. En el plano u-v, delante de la lente L_1 , se coloca una pupila con doble abertura formada por dos orificios idénticos A_1 y A_2 de diámetro D , cuyos centros $C_1(u_1, v_1)$ y $C_2(u_2, v_2)$ están separados

una distancia d . Las aberturas están simétricamente colocadas con respecto al eje del sistema, es decir $u_2 = -u_1$ y $v_2 = -v_1$. El espejo se ubica de manera que la intersección entre el eje que une el láser y el difusor y el eje del sistema óptico se encuentre en el centro del orificio del espejo.

En el cristal se registran las distribuciones de speckle provenientes de la pupila P a través de las aperturas A_1 y A_2 las cuales no están correlacionadas entre sí. El patrón de speckle sobre el cristal BSO resulta de la interferencia de las mencionadas distribuciones, ya que la iluminación es coherente. En todas las experiencias, el diámetro $D= 2.65\text{mm}$, $d=5.35\text{ mm}$ y $L_z=10\text{mm}$. La profundidad media del speckle imagen supera el espesor del cristal. La naturaleza estadística del proceso, hace que en lo que sigue consideremos valores promedios en los observables experimentales. Considérese un par de granos de speckle asociado, cada uno, a aperturas distintas; sus fases son constantes y son coherentes. Por lo tanto, los granos de speckle coincidentes espacialmente están modulados por franjas, siendo su período espacial:

$$\Lambda = \frac{Z_C \cdot \lambda_w}{d} \quad (1)$$

Estos granos de speckle se hallan modulados por un sistema de franjas (cosenoidal) perpendicular a la línea que une los centros de las aberturas y cuyo período medio Λ está dado por la Ecuación (1). En la mayoría de los casos se ajusta los parámetros experimentales para obtener tres franjas por grano de speckle.

Una diferencia de potencial V es aplicada entre las caras del cristal, las cuales están separadas una distancia L_x . La distribución de intensidad $I(x, y)$ genera fotocargas las cuales por el mecanismo de arrastre ó "drift"

(debido al campo externo $E_{ext} = \frac{V}{L_x}$) se

trasladan de las regiones altamente iluminadas a las menos iluminadas, donde son atrapadas. El campo aplicado está en el rango entre 1 y 10 kV, en donde el campo de difusión debido al rango en el que se encuentra el período de las franjas moduladoras de los granos de speckle (16-54 micrones), es despreciable y por lo tanto, predomina el campo externo aplicado. La generación de cargas es proporcional a la distribución de iluminación de entrada. Las cargas atrapadas crean un campo de carga espacial el cual, parcialmente compensa al campo externo. Produciéndose así, un campo interno resultante en cada punto.

De este modo, la distribución de intensidad $I(x,y)$ es registrada como una distribución espacial de campo eléctrico, el cual induce a través del efecto electro-óptico lineal, la correspondiente variación del índice de refracción. Por lo tanto, la distribución de entrada queda registrada en el cristal en términos de la variación de índice de refracción.

2.2. Proceso de reconstrucción

Si se ilumina el cristal uniformemente con una longitud de onda para la cual el cristal es sensible, la información registrada se borra debido a la relajación del campo de carga espacial. Por esta razón, en la etapa de lectura ver figura 2, se utiliza un haz expandido y colimado de baja intensidad proveniente de un láser de He-Ne de longitud de onda $\lambda_R = 632,8\text{nm}$ fuera de la región de fotoconductividad del cristal. La observación se realiza en el plano focal (U-V) mediante la lente convergente L_2 de distancia focal f . La distribución de intensidad en dicho plano es la expresión según la ref. [9].

La intensidad en dicho plano, consistirá de tres distribuciones de speckle, circulares, todas del mismo ancho espectral, determinado por el diámetro D de cada apertura. En la medida que este aumente, el sistema admitirá frecuencias componentes más altas.

2.3. Condiciones de observación del campo difractado

Es importante estudiar las características de los speckle modulados por franjas registrados en un cristal BSO. Para ello, se considerará la naturaleza en volumen del registro del speckle.

A partir de las experiencias realizadas, cuando se observa en el plano de Fourier la difracción del haz de lectura, se evidencia un comportamiento similar al que corresponde a un holograma de volumen. Es por ello que los resultados experimentales son analizados en términos de la difracción correspondiente a hologramas de volumen por transmisión. Teniendo en cuenta la expresión para el cálculo de la eficiencia de difracción de una red:

$$\eta = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \left(\frac{\xi}{2}\right)^2} \text{sen}^2 \left(L_z \sqrt{\kappa^2 + \left(\frac{\xi}{2}\right)^2} \right)$$

$$\text{donde } \kappa = \frac{\pi \cdot n \cdot \delta n}{\lambda_R \cdot \sqrt{n^2 - \text{sen}^2(\theta_0)}}$$

es la constante de acoplamiento y

$$\xi = K \left(\frac{\cos(\theta_0)}{\sqrt{n^2 - \text{sen}^2(\theta_0)}} \right) \Delta\theta$$

es el modulo del vector "off Bragg"; λ_R es la longitud de onda de lectura, n es el índice de refracción en la longitud de onda λ_R , L_z es el espesor del cristal, $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$, θ_0 es el ángulo

de Bragg en el proceso de registro medido fuera del cristal y $\Delta\theta$ es el apartamiento del ángulo de Bragg en la etapa de lectura; se presentan varias curvas teóricas de la eficiencia de difracción en función de la desviación angular de la condición de Bragg según: diferentes ángulos de registro θ_0 , en la figura 3; cristales de espesores diferentes, figura 4; y para valores diferentes de

$$\delta n(x) = n^3 r_{41} E(x) = n^3 r_{41} [M(E_D \text{sen}(Kx) - E_{ext} \cos(Kx)) + E_{ext}]$$

en donde $M = 2 \frac{\sqrt{I_1 I_2}}{I_m}$, $E_{ext} = \frac{V}{L_x}$ es el campo externo aplicado y $E_D = \frac{K_B T K}{q}$ es

el campo de difusión; en la figura 5, considerando datos experimentales. El comportamiento es el esperado: cuanto mayor sea el ángulo de registro y el espesor del cristal, más restrictivo angularmente resulta el holograma. Para el primer caso debido a que se aparta más de la condición de Bragg. Con respecto al espesor, la región de solapamiento es mayor dentro del cristal, es decir, la red de índice es mayor.

La variación de índices para el caso de bajas frecuencias depende directamente del campo externo aplicado, al imperar el proceso "drift" con respecto al de difusión en términos de la generación del campo de cargas espaciales, quien es responsable de la creación de la red de índice en el cristal.

2.4. Selectividad de los registros de speckle modulados

En la sección anterior fue enfatizado el comportamiento angular selectivo que muestran las redes de volumen y se analizó la eficiencia de difracción en términos de los parámetros experimentales. Es de interés entonces investigar en referencia a dicho comportamiento las evidencias de la naturaleza de volumen de las distribuciones de speckle. El registro en el cristal se produce como variaciones en el índice de refracción que replican la distribución de intensidad luminosa recibida. En referencia a la Figura 2, es claro que la línea que une los centros C_1 y C_2 de la pupila $P(u, v)$ es perpendicular a las franjas de interferencia que modulan a cada grano de speckle.

Considérese, que la red de vector de onda \vec{K} registrada en el cristal es leída

mediante un haz colimado de longitud de onda λ_R (haz de lectura). Para esta red, el

ángulo de Bragg es $\theta = \frac{\lambda_R}{\lambda_w} \frac{d}{2Z_C}$, medido

respecto al eje z. Sin embargo, considérese que la reconstrucción se realiza con el haz incidiendo según el eje z, es decir normal a la cara del cristal, como se muestra en la Figura 2.

3. RESULTADOS

3.1. Dependencia de la eficiencia de difracción con respecto al campo externo aplicado

Se observó que la eficiencia de difracción depende fuertemente de la magnitud del campo externo aplicado. En los registros realizados debido a la baja frecuencia espacial de las redes formadas dentro de los granos de speckle predomina el transporte de cargas por el mecanismo de arrastre ("drift"). Así, el campo aplicado es el factor predominante en la generación y la magnitud que alcanza el campo de carga espacial, el cual a su vez determina la profundidad δn de la red de índices en el registro. La eficiencia de difracción es nula cuando no hay campo externo aplicado al cristal y crece cuando lo hace dicho campo.

La dependencia de la amplitud de la red de índice (profundidad de la red) con el campo externo aplicado, resulta:

$$\delta n = n^3 r_{41} M \frac{V}{L_x} \quad (2)$$

Donde r_{41} es el coeficiente electro-optico del cristal. En el caso de un holograma de volumen, se observa en la Figura 5, un marcado aumento en la eficiencia de difracción cuando la amplitud δn aumenta. Este comportamiento es corroborado y se hace evidente al observar la figura 6 tanto en las imágenes de intensidad como en los perfiles, en donde se representa la eficiencia de difracción en función de diferentes campos

externos aplicados, en geometría de reconstrucción fija para un orden de difracción (a la derecha de la imagen).

En la figura 7, se muestran los puntos experimentales de la eficiencia de difracción en función del campo externo aplicado E_{ext} . Tales medidas fueron obtenidas teniendo en cuenta los parámetros característicos de registro, $D=2.65\text{mm}$, $d=5.35\text{mm}$ y $\alpha=0$. Nótese que en este caso $L=L_z$ (tamaño del cristal).

3.2. Dependencia de la eficiencia de difracción del ángulo entre el campo externo y el vector de red (orientación de las pupilas)

Es claro que la línea que une los centros de las aberturas $C1(u_1, v_1)$ y $C2(u_2, v_2)$ es perpendicular a las franjas de interferencia que modulan a cada grano de speckle. Como ya se detalló estas franjas asociadas con cada grano de speckle se convierten debido al efecto fotorrefractivo en una red de índices expresada por la birrefringencia δ_n . Nótese que el campo

externo aplicado \vec{E}_{ext} , introduce una anisotropía en el comportamiento cuando esta red es construida. \vec{K} es el vector de esta red de índices de módulo $|\vec{K}| = \frac{2\pi}{\Lambda}$. La

proyección del campo \vec{E}_{ext} sobre \vec{K} determina la contribución de los portadores por el mecanismo de arrastre que contribuye a la generación del campo de carga espacial.

Entonces, cuando \vec{K} y \vec{E}_{ext} son perpendiculares, este mecanismo no contribuirá a la formación de la red de índices. Experimentalmente, se observó que en estas condiciones la eficiencia de difracción es nula. Por lo cual, también podemos afirmar que el transporte de cargas por el mecanismo de difusión es despreciable. Esto es esperable debido a la baja frecuencia de las franjas registradas.

Entonces, para generalizar la Ec. (2), debería ser reformulada:

$$\delta n = n^3 r_{41} M (\vec{E}_{ext} \cdot \vec{K}_r) = n^3 r_{41} M E_{ext} \cos \alpha \quad (3)$$

donde α es el eje que forma \vec{E}_{ext} y el vector unitario $\vec{K}_r = \vec{K}/K$.

Este comportamiento puede ser observado en la Figura 8 y 9. Se han considerado diferentes orientaciones de las aberturas de la pupila descritas por el ángulo α . Esto fue realizado para una separación d fija. Nótese que a medida que se aumenta el ángulo α , la eficiencia de difracción de los órdenes laterales disminuye. En particular, cuando α es aproximadamente noventa grados, la difracción en aquellos desaparece y toda la intensidad contribuye al orden cero.

En la figura 10, se muestran los puntos experimentales de la eficiencia de difracción en función del ángulo α . Los puntos fueron obtenidos teniendo en cuenta los parámetros que caracterizan la experiencia: $d=5.35\text{mm}$, $D=2.65\text{mm}$ y $E_a=7\text{kV/cm}$ y $\alpha=[0.0389 \ 0.3302 \ 0.5146 \ 0.9287 \ 1.0833 \ 1.2290]\text{rad}$. La lectura fue off-Bragg y los tiempos de registro fueron los mismos en todos los casos.

Como estudiamos en las secciones anteriores, para las frecuencias espaciales utilizadas, solo contribuye de manera considerable el arrastre o "drift". De acuerdo a la ecuación 3, existe una fuerte dependencia entre la dirección de la red formada y el campo externo aplicado.

4. CONCLUSIONES

Los anteriores análisis, permiten visualizar cómo seleccionar las condiciones experimentales, en términos de lograr un compromiso que mantenga buenos valores de eficiencia, en combinación con la modalidad de registro de speckle modulado de una superficie reflecto-difusora junto con los analizados previamente en la ref. [8]:

Los resultados experimentales que se estudiaron en este trabajo, fueron obtenidos a partir de la observación del campo difractado por diversos registros de patrones de speckle modulados. Las experiencias realizadas muestran los efectos asociados con la variación de uno o varios de los siguientes parámetros:

- La diferencia de potencial V aplicada al cristal, la cual define la magnitud $E_X = V/L_X$ del campo aplicado.
- La orientación de las aberturas α .
En todos los casos $Z_C = 440\text{mm}$.

En la Tabla 1, se visualizan los parámetros seleccionados para la optimización del esquema experimental para registro de speckle modulado, generados a partir de superficies reflecto-difusoras. Bajo estas condiciones el montaje experimental puede utilizarse para medida de desplazamientos y vibraciones de superficies reflecto-difusoras.

| Diámetro de Aberturas (D) | Separación de aberturas (d) | Tamaño de cristal (Lz) | Campo externo aplicado $E_X = V/L_X$ | Orientación de aberturas α |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 2.65 mm | 5.35 mm | 10 mm | 7 kV/cm | 0 rad |

Tabla 1: Parámetros para un óptimo registro de speckle modulado de superficies reflecto-difusoras, con $Z_C=440\text{mm}$.

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). **Martha 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. Tebaldi, A. Lencina, N. Bolognini, (2002), *Analysis and applications of the speckle patterns registered in a photorefractive BTO crystal*, Opt. Commun. 202 257-270.

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

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

4.-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.

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

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

7.-H. J. Tiziani, K. Leonhardt, J. Klenk, (1980), *Real-time displacement and tilt analysis by speckle technique using Bi₁₂SiO₂₀ crystals*, Opt. Commun. **34**, 327.

8.-Martha Molina, María del C. Lasprilla, Myrian Tebaldi, y Nestor Bolognini, (2009), "Optimización del Esquema experimental para

registro de speckle generados a partir de superficies reflectantes", Bistua. Vol 7 (2). ISSN. 0120-4211.

9.-E. Vanidhis, J. Spyridelis, (1982), An image multiplexing method, through internal modulation of speckle pattern, Optik, 61, 195.

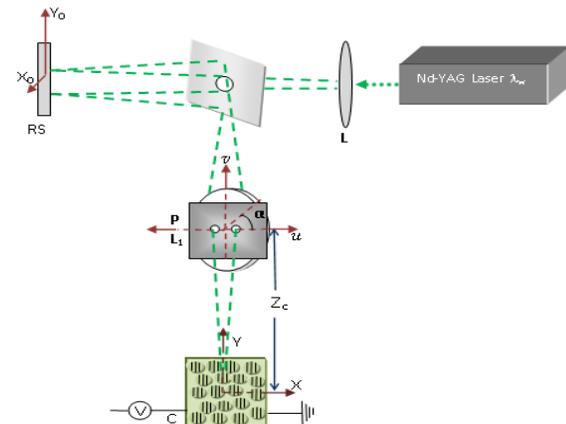


Figura 1: Esquema experimental del proceso de registro (P: máscara con doble apertura; L₁; L: objetivo de microscopio; RS: superficie difusora)

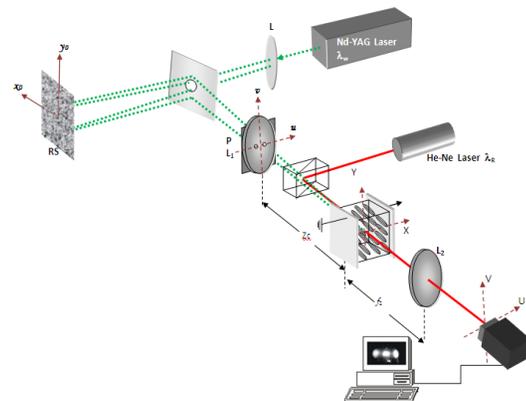


Figura 2: Esquema experimental para el registro fotorrefractivo de speckle modulado y para la observación del campo difractado por los registros. RS: Difusor-reflector; L₁ y L₂: Lentes; P: Pupila; BS: Divisor de haz; Z_c: Distancias imagen, respectivamente; f: Distancia focal de la lente L₂

57

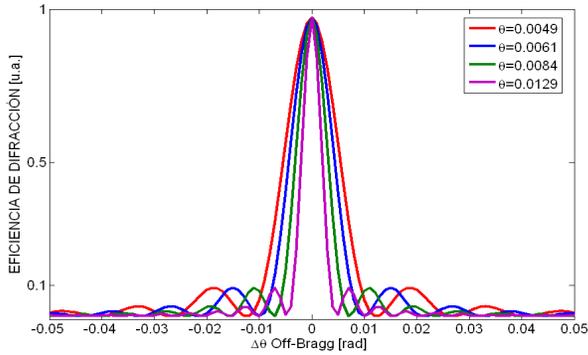


Figura 3: Comportamiento de la eficiencia de difracción en función de la desviación angular para $\lambda_{lectura} = 632,8\text{ nm}$, $\lambda_{registro} = 532\text{ nm}$, $\delta n = 2,83 \times 10^{-5}$, $n = 2,53$, $L_z = 10\text{ mm}$ y diferentes valores del ángulo de registro θ .

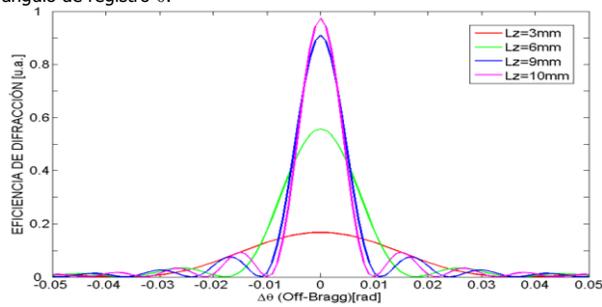


Figura 4: Comportamiento de la eficiencia de difracción en función de la desviación angular para: $\lambda_{lectura} = 632,8\text{ nm}$, $\lambda_{registro} = 532\text{ nm}$, $\delta n = 2,83 \times 10^{-5}$, $n = 2,53$, ángulo de registro $\theta = 0,008\text{ rad}$ y diferentes espesores de cristal.

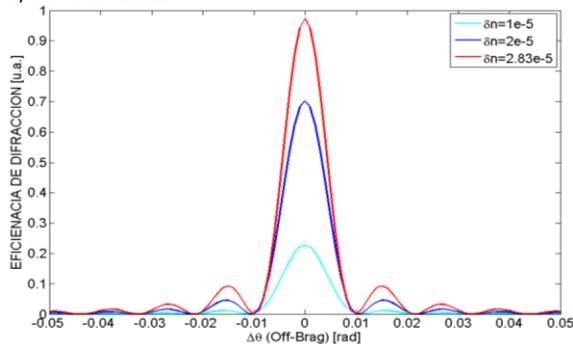


Figura 5: Comportamiento de la eficiencia en función de la desviación angular para: un ángulo de registro $\theta =$

$0,008\text{ rad}$, $\lambda_{lectura} = 632,8\text{ nm}$, $\lambda_{registro} = 532\text{ nm}$, $n = 2,53$, y diferentes valores de δn .

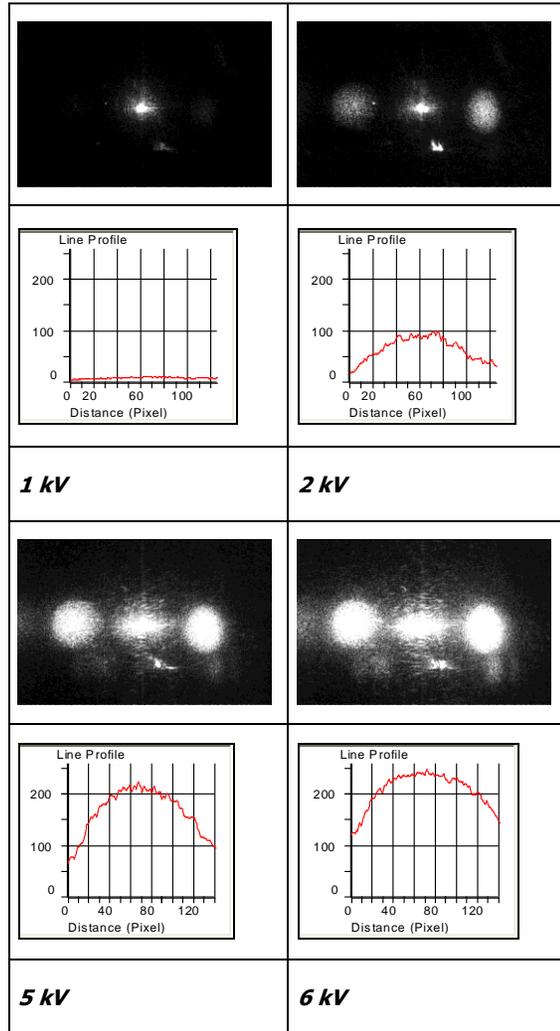


Figura 6: Distribución de intensidad en el plano de difracción para diferentes diferencias de potencial aplicadas en geometría de reconstrucción fija. Cristal $10 \times 10 \times 10\text{ mm}$, $Z_c = 440\text{ mm}$, $D = 2.65\text{ mm}$, $d = 5.35\text{ mm}$.

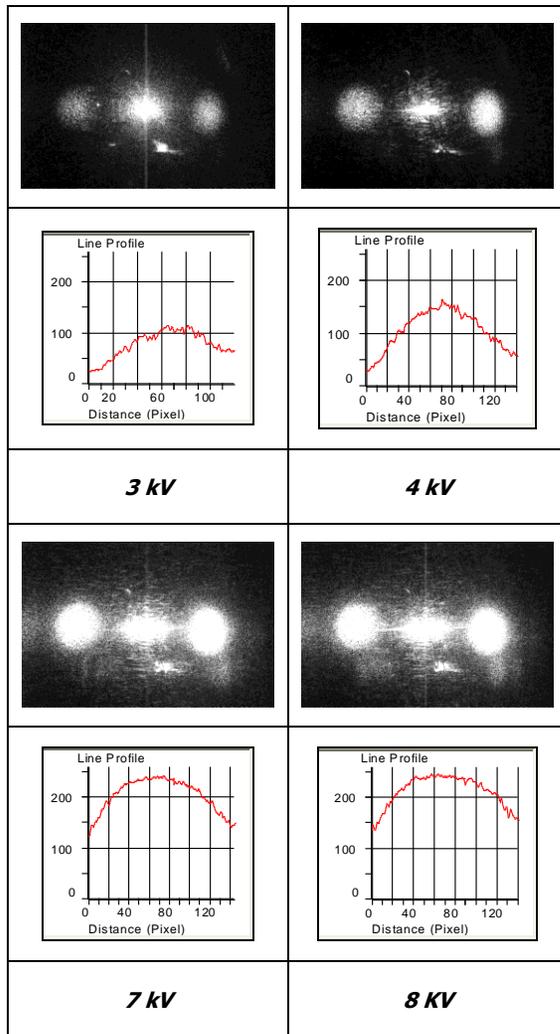


Figura 6: Distribución de intensidad en el plano de difracción para diferentes diferencias de potencial aplicadas en geometría de reconstrucción fija. Cristal 10x10x10mm, $Z_c=440$ mm, $D=2.65$ mm, $d=5.35$ mm.

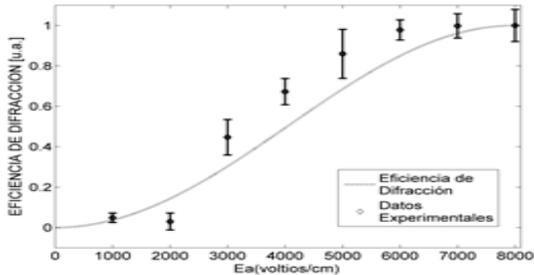


Figura 7: Eficiencia de difracción en términos del campo externo aplicado, para $d=5.35$ mm, $D=2.65$ mm, $L_z=10$ mm. Para $E_a=[1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8]$ [kV/cm]. Los puntos son obtenidos de los valores picos de los perfiles de intensidad.

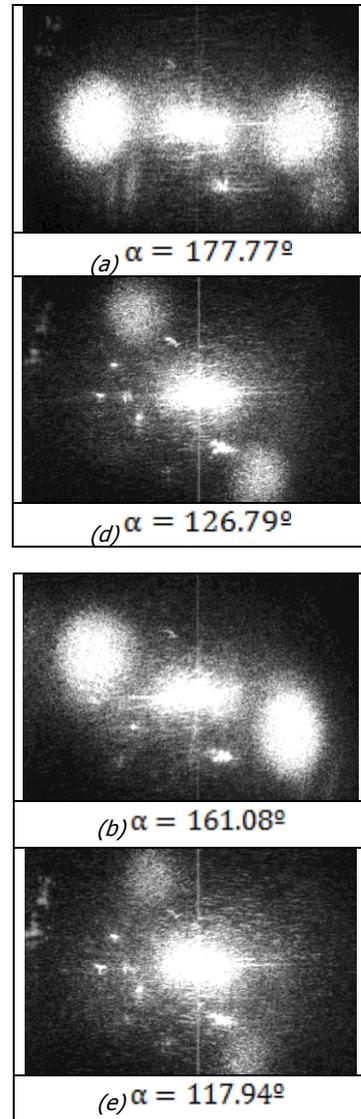


Figura 8: Intensidad difractada para diferentes valores del ángulo α formado entre la línea que une los centros de las aberturas y el eje u (ver Figura 1) y en geometría de reconstrucción fija.

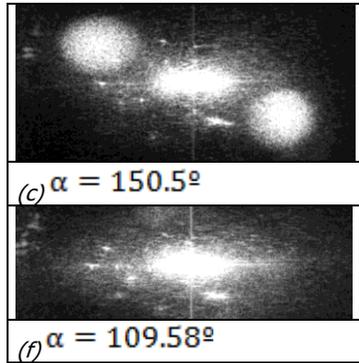


Figura 8: Intensidad difractada para diferentes valores del ángulo α formado entre la línea que une los centros de las aberturas y el eje u (ver Figura 1) y en geometría de reconstrucción fija.

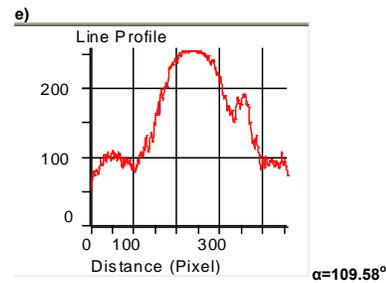
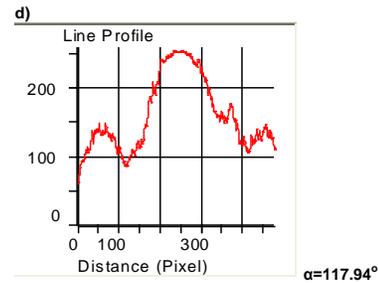
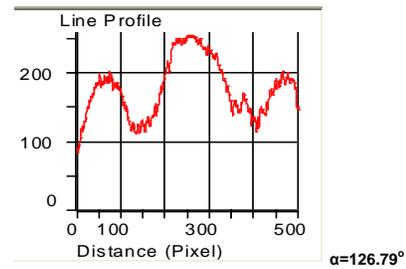
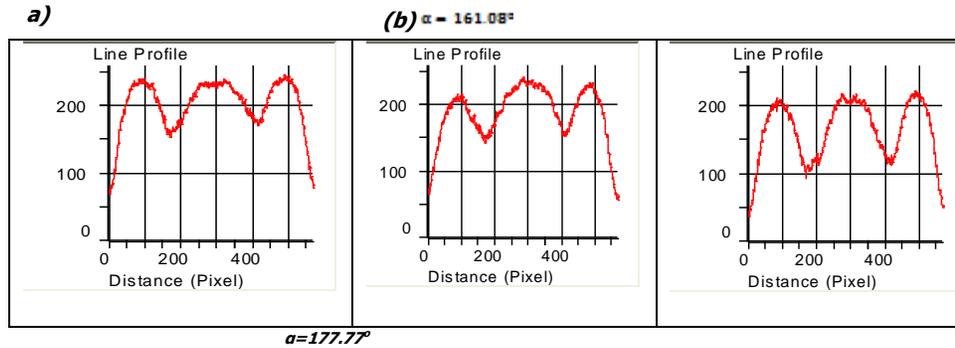


Figura 9: Perfiles de intensidad en el plano de Fourier para diferentes valores del ángulo α formado entre la línea que une los centros de las aberturas y el eje u (ver Figura 1). Se observa la saturación del orden cero.

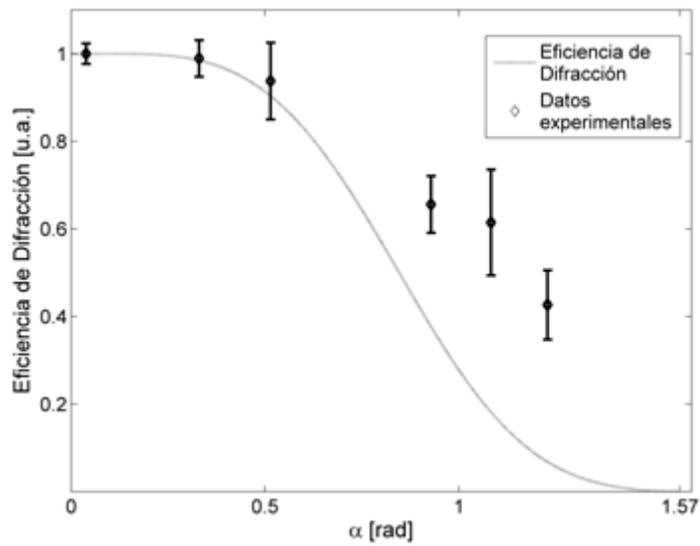


Figura 105: Eficiencia de difracción en términos de la orientación de las aberturas de la pupila

, para $d=5.35\text{mm}$, $D=2.65\text{mm}$ y $E_a=7\text{kV/cm}$ y

$$\alpha = [0.0389 \quad 0.3302 \quad 0.5146 \quad 0.9287 \quad 1.0833 \quad 1.2290] \text{ rad}$$

Los puntos son obtenidos de los valores picos de los perfiles de intensidad.