ESTUDIO DE TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE EN UN CRISTAL FOTORREFRACTIVO BGO
(Holografía Convencional y Doble Apertura)

DORIAN CARABALLO LEDESMA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA

BUCARAMANGA

2004

ESTUDIO DE TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE EN UN CRISTAL FOTORREFRACTIVO BGO
(Holografía Convencional y Doble Apertura)

DORIAN CARABALLO LEDESMA

Tesis de grado presentada como requisito parcial
para optar al título de Físico

Directora:

Dra. María del Carmen Lasprilla Álvarez

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES
BUCARAMANGA
2004

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos:

- A mi Querida madre Isolina Ledesma Villadiego por su apoyo incondicional.

- A la Dra. María del Carmen Lasprilla A, por su dirección y orientación para el desarrollo de este trabajo.

- Al Dr. Yezid Torres Moreno, al Dr. Arturo Plata, al Dr. Jader Guerrero, al Dr. Jaime Meneses, al Dr. Rene Salazar, al Dr Rafael Cabanzo, al Msc. Alberto Patiño y demás integrantes del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales.

- A la administración de la escuela de física de la Universidad Industrial de Santander, en especial a su secretaria Edilia Quintero.

- A toda mi familia por sus detalles y gentileza.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN.....1

1. GENERALIDADES Y MARCO TEÓRICO…….....3
1.1 ‘’LASER SPECKLE‘’……....3
1.1.1 Definición ……....3
1.1.2 Dimensiones del Speckle……...…...3
1.1.3 Estadísticas del Speckle…….....…….....4
1.2 FRANJAS DE INTERFERENCIA POR DESPLAZAMIENTO EN EL PLANO DE PATRONES DE SPECKLE.....6
1.2.1 Distribución de intensidad del speckle y amplitud transmitida……....6
1.2.2 Transformada de Fourier y espectro de energia…… 6
1.3 EFECTO FOTORREFRACTIVO…….....7
1.3.1 Antecedentes…….....7
1.3.2 Formación de la red de Indices…….....8
1.3.3 Características Fisicas de los Cristales Tipo Silenitas…….....9
1.3.4 Actividad óptica y efecto electro-óptico lineal……....10
1.4 HOLOGRAMAS DE TRANSMISIÓN Y VOLUMEN…….....12
1.4.1 Registro de Holograma……....12
1.4.2 Eficiencia de Difracción…….....12
1.4.3 Condicion de Bragg y lectura del Registro…….....13

2. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL……..……....14
2.1 Técnica Holográfica Convencional……..14
2.1.1. Proceso de Registro……..14
2.1.2. Proceso de Lectura……....14
2.2 Técnica por Doble Apertura……...16
2.1.3. Proceso de Registro……...16
2.1.4. Proceso de Lectura…….....16

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES…….....18
3.1 Técnica Holográfica Convencional……..18
3.1.1 Eficiencia de difraccion con respecto a los angulos de registro……....18
3.1.2 Dimensiones del patrón de speckle con relación al diámetro de la pupila……....19
3.1.3 Franjas de interferencia por doble exposición para distintos desplazamientos….21
3.1.4 franjas de interferencia por doble exposición con haz lectura rojo……...23
3.2 Técnica por Doble Apertura…….…….....26
3.2.1 Selectividad de los registros de speckles modulados……....26
3.2.2 Dependencia de la eficiencia de difracción con el campo aplicado…….26
3.2.3 Eficiencia de difracción para distintos valores del ángulo α.……....28
3.2.4 Eficiencia de difracción con respecto a la línea que une las aberturas.....29
3.2.5 Franjas de interferencia por doble exposición para distintos desplazamientos....31

4. CONCLUSIONES…….....34

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....37

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Distribución de speckle 3

Figura 2 : Superposición de contribuciones…. .....…….3

Figura 3: Dimensiones del Patron de Speckle 4

Figura 4: Formación de Franjas de Young 7

Figura 5: Formación de la Red de Indices. 8

Figura 6: Hologramas de Volumen 13

Figura 7: Esquema experimental: Holografía convencional 15

Figura 8: Esquema experimental: Holografía convencional con láser rojo.....15

Figura 9: Esquema experimental: Registro doble Apertura 16

Figura 10: Esquema experimental: Lectura doble Apertura.....17

Figura 11: Eficiencia de difracción para el registro de ondas planas 19

Figura 12:Tamaño del speckle con el diámetro de pupila 21

Figura 13: Franjas de interferencia por doble exposición 22

Figura 14: Doble exposicion rojo y verde 23

Figura 15: Doble lectura de speckle 24

Figura 16: Doble franja 20μm 24

Figura 17: Doble franja 16μm 24

Figura 18: Perfiles de intensidad 25

Figura 19:Speckle modulado 26

Figura 20: Eficiencia de difracción con el campo aplicado.....27

Figura 21: Eficiencia de difracción y orientación de la pupila.....29

Figura 22: Eficiencia de difracción con respecto a la separación de aberturas 30

Figura 23: Eficiencia de difracción y orientacion del haz lectura 31

Figura 24: Franjas de interferencia doble exposición.....32

Figura 25 Perfil de intensidad doble abertura 33

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Índices de refracción y coeficientes electro-ópticos de materiales fotorrefractivos. 10

Tabla 2. Actividad óptica.....11

TITULO: **ESTUDIO DE TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA SPECKLE EN UN CRISTAL FOTORREFRACTIVO BGO (Holografía Convencional y Doble Apertura)**

AUTOR: **DORIAN CARABALLO L.**

PALABRAS CLAVES: **Speckle, Interferometría Speckle, Efecto Fotorrefractivo, Mediciones Comparativas.**

RESUMEN

El estudio de patrones speckle registrado por fotografía convencional o digitalmente ha sido usado en una amplia variedad de eventos en los que se determinan desplazamientos, vibraciones o deformaciones pequeñas, desde situaciones casi estáticas hasta altas velocidades. En este trabajo se presenta un análisis comparativo de arreglos experimentales de dos técnicas de speckle: holográfica convencional y doble apertura para microdesplazamientos de un objeto, en las dos técnicas el speckle es modulado por franjas de Young, para el primer caso se hace referencia a una modulación a alta frecuencia y, en el segundo a una modulación de baja frecuencia, en las dos técnicas se hace doble exposición, una para la posición inicial del objeto y la otra para una posición desplazada del objeto. El registro y la lectura se realizan en tiempo casi-real en arreglos holográficos usando un cristal fotorrefractivo, la información en estos cristales es codificada como una variación local del índice de refracción, para los dos casos se considera la naturaleza en volumen del registro del speckle. El contraste de las franjas interferométricas se analiza en términos de la eficiencia de difracción del haz de lectura y de los parámetros de registro. Se presentan los resultados para cada configuración.

TITLE: **STUDY OF TECHNIQUES SPECKLE INTERFEROMETRY IN A PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL BGO (Conventional Holography and Double-Aperture)**

AUTHOR: **DORIAN CARABALLO L**.

KEY WORDS: Speckle Pattern, Speckle Interferometry, Photorefractive Effect, Comparative Measurement.

ABSTRACT

The study of speckle patterns by photography or digitally have been used in a wide variety of events of measures of displacements, vibrations or small deformations, from almost static situations until high speeds. In this work a comparative analysis of experimental arrangements of speckle techniques is presented: a conventional holography and double aperture, for micro displacements of objects, in both cases, the speckle is modulated by Young strips, of such form that the first case makes reference to a modulation to high frequency, and in the second case show a low frequency , also it is had in the two techniques it is made double- exposure, one for the starting point of the object and the other for the object displacement. The registration and the reading are carried out in almost-real time in holographic arrangements using a photorefractive crystal; the information in these crystals is codified like one variation local of index of refraction. In the two cases it is considered the nature in volume of the registers of the speckle. The contrast of the interference fringes is analyzed in terms of the diffraction efficiency of the readout beam and of the registration parameters. The results are presented for each configuration.

INTRODUCCIÓN

El láser speckle es el resultado de la dispersión de la luz coherente por un objeto difusor, observándose una distribución de zonas brillantes y oscuras de manera aleatoria [1-4]. Este fenómeno es tratado en muchas técnicas como la fotografía speckle, correlación speckle y la tomografía speckle entre otras, estas técnicas permiten aplicaciones en metrología óptica de muy buena resolución, desde medidas de pequeños desplazamientos, velocidades y hasta vibraciones, hoy en día se usan estos métodos para el control de calidad y monitoreo de estructuras de piezas mecánicas, además que proporcionan ensayos no destructivos.

El speckle ha sido estudiado generalmente mediante un enfoque bidimensional, aunque su verdadera naturaleza es en volumen [3], por esto se aprovecha el registro en volumen de los cristales fotorrefractivos. El efecto fotorrefractivo se caracteriza por un cambio local del índice de refracción de un material electro-óptico y fotoconductor debido a una distribución luminosa no uniforme, la gran ventaja de estos cristales respecto a otros medios de registro (por ejemplo las placas holográficas) es que son reversibles y no requieren de procesado adicional para leer la información almacenada [6-9], debido a esto los cristales se pueden utilizar en aplicaciones en tiempo real en metrología óptica para medir microdesplazamientos.

Se propone comparar dos técnicas interferométricas de speckle: una mediante holográfica convencional y otra por doble apertura; usando en ambos casos como medio de registro un cristal fotorrefractivo [10,11]. Esta experiencia nos permitirá analizar y comparar los resultados del registro y lectura en un cristal BGO y así, poder determinar que parámetros son determinantes en una mejor eficiencia y, por lo tanto como aprovechar mejor cada técnica a la hora de hacer mediciones de microdesplazamientos en el plano.

El trabajo de tesis consta de cuatro capítulos cuyo orden se presenta a continuación:

En el capitulo 1 se hace una presentación de los conceptos fundamentales del fenómeno de granularidad óptica (speckle), mencionando su definición, su carácter tridimensional, tamaño del speckle, y algunos aspectos sobre su formalismo estadístico. En lo que sigue del mismo capitulo se habla de las franjas de interferencia por desplazamiento en el plano de patrones de speckle, se trata sobre el formalismo matemático de la intensidad del campo speckle y su corrimiento representado como una convolución, luego veremos la amplitud transmitida en el medio de registro como la transformada de Fourier de la convolución representada. También en este mismo capitulo entraríamos ha describir el efecto fotorrefractivo, se revisan los antecedentes históricos, su concepto como tal, describiremos los pasos para la formación de la red de índices y las propiedades físicas de los cristales tipo silenitas. Luego se describe la formación de redes holográficas en medios de volumen, en nuestro caso que serian los cristales fotorrefractivos, mencionaremos la interferencia de dos haces coherentes, como también la modulación del índice de refracción en el cristal, la condición de Bragg y la eficiencia de difracción con relación a un haz coherente de lectura. Aparte en el capitulo 2, se describe el procedimiento experimental tanto para el esquema de doble abertura y el de holografía convencional, aquí se tratan los procesos de registro y lectura para cada caso. Siguiendo después en el capítulo 3 con los resultados experimentales para cada configuración, donde se muestran distintas imágenes que darán a conocer los cambios en los parámetros dados en los procesos de registro y lectura. Por ultimo para terminar en el capitulo 4 se mencionan las conclusiones, el análisis de los objetivos y la proyección esperada.

1. GENERALIDADES Y MARCO TEORICO

1.1 ‘’LASER SPECKLE‘’

1.1.1 DEFINICION

El ‘’laser speckle’’ es una distribución aleatoria de intensidad luminosa (ver Figura1), que se presenta cuando un haz de luz coherente se dispersa o se refleja en una superficie rugosa y donde dichas rugosidades introducen diferencias de camino óptico superiores a la longitud de onda [3,4,12,13]. Cuando se forma una imagen del difusor mediante una lente el speckle se denomina speckle subjetivo y si este es proyectado a través de una pantalla se llama speckle objetivo [2,3, 4].

Se tiene entonces que cuando la luz viaja desde el difusor (d) pasando por la pupila (P) a un punto de observación O en el plano H ,ver Figura 2., este punto es la superposición de las contribuciones individuales que pertenecen a la superficie rugosa, introduciendo en cada lugar las amplitudes y fases aleatorias.

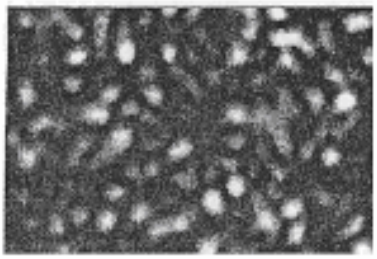


Figura1. Distribución Speckle

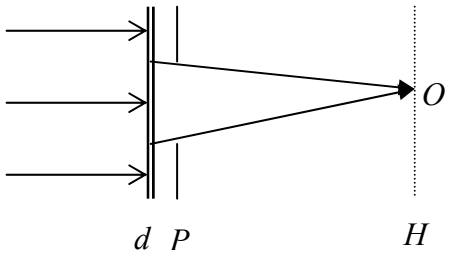


Figura 2 superposición de contribuciones

1.1.2 DIMENSIONES DEL SPECKLE

Cuando se habla de las dimensiones de los patrones de speckle, estos están determinados por la región de coherencia (espacial) que pertenecen a ese patrón de speckle, de modo que los granos ocupan cierto volumen en el espacio, el cual se le asocia a la forman de un cigarro [4,13]. En la Figura 3 se puede apreciar

$\alpha \approx z/D$ y los tamaños promedios del speckle tanto de la dimensión transversal, $\partial t \approx z\lambda/D$ como también la profundidad del grano $\partial z \approx z^2\lambda/D^2$. Donde, λ es la longitud de onda de la fuente, d es el plano difusor, z es la distancia imagen de la lente L al plano H y D es el diámetro de la pupila P.

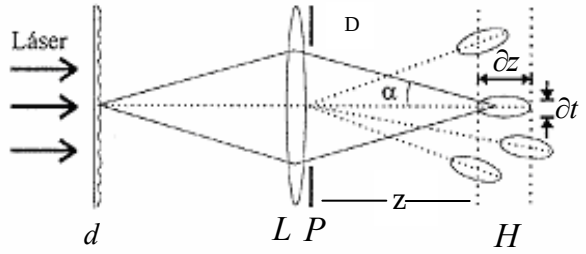


Figura 3. Dimensiones del patrón de speckle ∂z y ∂t.

1.1.3 ESTADISTICA SPECKLE

Debido a su característica aleatoria o estocástica, el formalismo matemático del ‘’laser speckle’’ esta regida por la estadística de primer y segundo orden [12,13], la primera hace referencia a las propiedades del speckle con respecto a las coordenadas en un solo punto y la otra con relación a dos o más puntos distintos. Para la estadística de primer orden tenemos que la amplitud compleja del campo en un punto de observación es:

$$A(X,Y,Z) = \left|A(X,Y,Z)\right| \exp\left[i\theta(X,Y,Z)\right] \tag{1}$$

donde la intensidad vienen dada por $I(X,Y,Z) = \left|A(X,Y,Z)\right|^2$ y teniendo en cuenta que el patrón de speckle es la contribución de todas las componentes dispersoras se tiene que:

$$A(X,Y,Z) = \sum_{K=1}^{M} \frac{1}{\sqrt{M}} f_K(X,Y,Z) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{K=1}^{M} \left|f_k\right| \exp(i\theta_k)\,. \tag{2}$$

$1/\sqrt{M}\ f_k(X,Y,Z)$; k = 1, 2, 3,… M, son todas las contribuciones individuales para la amplitud f_k y θ_k para la fase.

Como M es un número apreciablemente grande se tiene que la ecuación de la amplitud se aproxima a una variable aleatoria Gaussiana donde la función de densidad de probabilidad asociada a $A(X,Y,Z)$ esta dada por:

$$P(A) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{ -\frac{|A|^2}{2\sigma^2} \right\} \tag{3}$$

donde

$$\sigma^2 = \lim_{M\to\infty} \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{M} \frac{\left\langle |f_k|^2 \right\rangle}{2} = \frac{\langle I \rangle}{2} \tag{4}$$

es la varianza.

Para la intensidad y la fase del campo se tiene que:

$$P_I(I) = \begin{cases} \dfrac{1}{\langle I \rangle} \exp\left\{ -\dfrac{I}{\langle I \rangle} \right\}, & I \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{5}$$

$$P_\theta(\theta) = \begin{cases} \dfrac{1}{2\pi}, & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{6}$$

Para la intensidad, la densidad de probabilidad $P_I(I)$ se ajusta a un exponencial negativo [13], y la función $P_\theta(\theta)$ para la distribución estadística de la fase es uniforme.

Luego se tiene que la varianza de la distribución de probabilidad de la intensidad [13], $P_I(I)$ es igual a

$$\sigma_I{}^2(I) = \left\langle I^2 \right\rangle - \left\langle I \right\rangle^2 = \left\langle I \right\rangle^2 \tag{7}$$

Si se define el contraste del speckle como C que es la razón $C = \sigma_I(I) / \langle I \rangle$ el cual es igual a la unidad si

$$\sigma_I\ (I) = \left\langle I \right\rangle\ . \tag{8}$$

1.2 FRANJAS DE INTERFERENCIA POR DESPLAZAMIENTO EN EL PLANO DE PATRONES DE SPECKLE

1.2.1 DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD DEL SPECKLE Y AMPLITUD TRANSMITIDA

Si $D(\eta,\xi)$ representa la distribución de intensidad del campo speckle para una posición del plano dispersor d (difusor), entonces $D(\eta,\xi)+D(\eta,\xi-\xi_0)$ es la nueva distribución para el corrimiento del difusor y este también puede escribirse como: $D\otimes\left[\partial(\eta,\xi)+\partial(\eta,\xi+\xi_0)\right]$ ya que una traslación es equivalente a la convolución entre el campo difusor $D(\eta,\xi)$ y dos deltas de Dirac corridos [3].

La amplitud transmitida en el medio de registro es función del patrón de intensidad incidente sobre el mismo, de modo que la amplitud transmitida t en el plano focal de la lente L (ver Figura 4), guarda una relación lineal con la intensidad registrada:

$$t = a - b\left\{ \mathrm{D}\otimes\left[\partial(\eta,\xi)+\partial(\eta,\xi+\xi_0\right]\right\} \tag{9}$$

donde a y b son constantes.

1.2.2 TRANSFORMADA DE FOURIER Y ESPECTRO DE ENERGIA.

La amplitud en el plano de Fourier de t esta dada por:

$$U(u,v) = a.\partial(u,v) - b\left[\tilde{D}.\left(1+\exp(jk\xi_0\right)\right] \tag{10}$$

donde u y v son las nuevas coordenadas angulares (ver Figura 4), el primer término es una función delta que representa la imagen directa de la fuente luminosa del objeto dispersor d. Esta imagen esta localizada en el foco de la lente L, es de tamaño muy pequeño y no se toma en cuenta. El segundo factor representara el espectro $\tilde{D}$ multiplicado por $(1+\exp(jkv\xi_0))$ que es la transformada de Fourier de dos delta de Dirac, el espectro $\tilde{D}$ es otro patrón de speckle esparcido por todo el campo en el plano focal de modo que la intensidad es

$\left|\tilde{D}^2\right|\cos^2 k\xi_0/2$ y el espectro $\left|\tilde{D}^2\right|$ es modulado por franjas de Young que son perpendiculares a la dirección del desplazamiento[3,4]. La superposición de dos patrones de speckle ligeramente desplazados sobre un plano de registro F (figura 4) es otro patrón de speckle el cual es una distribución aleatoria de pares de pequeños granos, uno de los granos de la primera exposición guarda una posición con respecto a otro que es idéntico pero con cierto desplazamiento, estos pares de granos actúan como dos pequeñas e idénticas fuentes coherentes que producen franjas de Young en el campo lejano *M*. Esa misma interferencia es producida por cada par de granos y distribuida en todo el plano F.

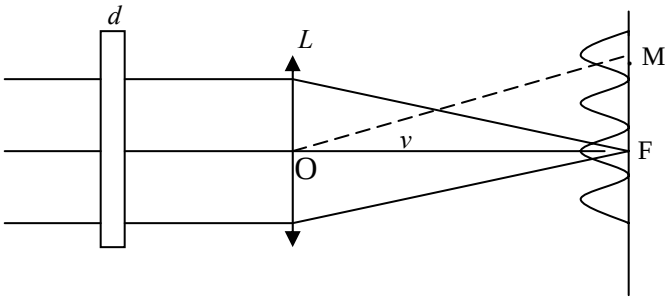


Figura 4 franjas de Young

1.3 EFECTO FOTORREFRACTIVO

1.3.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

El efecto fotorrefractivo se descubre accidentalmente en los laboratorios Bell con Arthur Ashkin y sus colaboradores en el año 1966 utilizando cristales de Niobato de Litio $(LiNbO_3)$ [14], la luz láser que incidía sobre estos cuando se investigaba la generación de segundo armónico, se distorsionaba difundiéndose luz por todo el laboratorio (daño óptico), la luz del láser había modificado las propiedades del cristal mismo, de tal manera que había modificado de manera semi-permanente el índice de refracción del cristal [7].

Debido a que los materiales fotorrefractivos son fotoconductores y electro-ópticos, alteran sus propiedades cuando la luz pasa a través de ellos [7-9], se les

considera medios ópticos no lineales, a diferencia de los medios ópticos lineales como las lentes, los prismas y los filtros polarizadores.

Hoy en día el termino fotorrefractivo se reserva generalmente para materiales cuyo índice de refracción cambia en respuesta a la luz de baja intensidad [6,14], la luz que pasa a través de ella por débil que sea, cambia el índice de refracción y este cambio es de extrema importancia en el grabado de hologramas.

1.3.2 FORMACION DE LA RED DE INDICES

Cuando dos haces de luz láser interfieren en un cristal fotorrefractivo crean un patrón de luz que consistente de zonas brillantes y oscuras alternadas [7,9] (ver Figura 5.1), esto produce una distribución de las cargas móviles (por difusión y/o por arrastre ‘’drift‘’, cuando se aplica un campo externo), donde los electrones móviles se alejan o emigran de las zonas claras a las regiones oscuras (Figura 5.2). A medida que las cargas se van desplazando, la intensidad del campo eléctrico en el interior del cristal aumenta y se vuelve periódico, (Figura5.3); este campo deforma ligeramente la red cristalina y crea un reticulado del índice de refracción el cual queda modulado (Figura5.4).

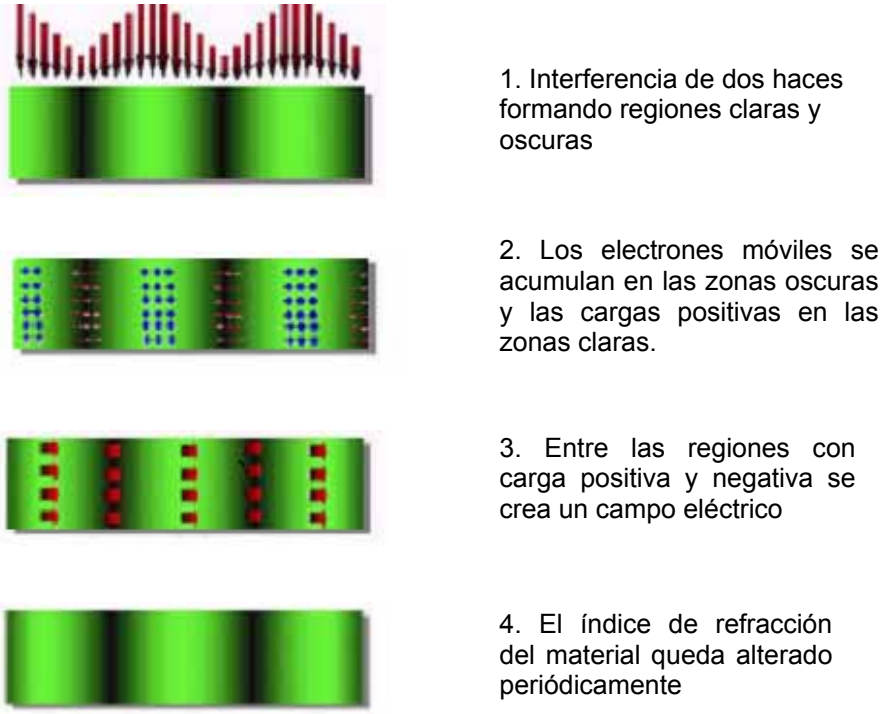


Figura 5. Formación de la red de índice.

1.3.3 CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS CRISTALES TIPO SILENITAS

En los cristales fotorrefractivos tipo silenita: $Bi_{12}SiO_{20}$ y $Bi_{12}GeO_{20}$ conocidos comúnmente como BSO y BGO, que son óxidos combinados de bismuto, silicio y germanio; pertenecen al sistema cúbico, son naturalmente isótropos y no poseen centro de inversión, lo que determina muchas de las propiedades ópticas y dieléctricas que presenta, entre ellas el efecto electro óptico-lineal por su importancia en el efecto fotorrefractivo. Cuando un campo eléctrico es aplicado en estos cristales se induce birrefringencia lineal, que en este caso seria el efecto electro óptico lineal, estos cristales poseen cambios en la actividad óptica natural (caracterizada por el poder rotatorio) el cual se asocia a la birrefringencia circular, ambos efectos aparecen simultáneamente y son difíciles de separar. Los cristales silenitas tienen alta sensibilidad en la región verde–azul del espectro, poseen tiempos de respuesta que pueden variar desde los segundos hasta los microsegundos para intensidades del orden de mW/cm^2 y de picó segundos para láseres pulsados de alta potencia [6]. Por lo tanto son muy usados en aplicaciones de procesamiento óptico en tiempo real, holografía, interferometría holográfica, conjugación de fase, etc.

Los cristales BSO y BGO pertenecen al sistema cúbico de la clase 23 presentan actividad óptica y su tensor electro óptico posee tres coeficientes iguales diferentes de cero [7,8]; $r_{41} = r_{52} = r_{63}$

Si se parte de la definición, El efecto fotorrefractivo se presenta en todos los materiales que presenten efecto electro-óptico y sean fotoconductores, estos cuentan con una determinada cantidad de donadores y aceptores. Pero el uso de estos materiales va de acuerdo a las características que lo describen (ver Tabla 1) resaltándose por lo tanto los siguientes aspectos:

1- Figura de merito electro-óptica $n^3 r$, este determina el máximo cambio que se puede producir en el índice de refracción.

2- Sensibilidad fotorrefractiva, S o el reciproco S^{-1} que seria la densidad de energía que se necesita para alcanzar una eficiencia de difracción de 1%, de acuerdo al espesor del cristal.

3-Tiempo de respuesta τ , para grabado y borrado de una red fotorrefractiva, de acuerdo a una intensidad de iluminación.

4- Tiempo de almacenamiento, es el tiempo necesario para que se borre una red fotorrefractiva en la oscuridad.

Tabla 1. Índices de refracción y coeficientes electro-ópticos de algunos materiales fotorrefractivos.[20]

Material fotorrefractivo	Índice de Refracción	Coeficiente electro-óptico(pm/V)	n^3r
$LiNbO_3$	$n_3=2.20$	$r_{33}=31$	358
$KNbO_3$	$n_3=2.23$	$r_{33}=64$ $r_{42}=380$	710
$BaTiO_3$	$n_3=2.36$	$r_{33}=28$ $r_{51}=1640$	368
BSO	n=2.54	$r_{41}=4$	82
BGO	n=2.54	$r_{41}=4$	56
AsGa	n=3.60	$r_{41}=1.1$	51
CdTe	n=2.84	$r_{41}=4.5$	103
Polimero HCC132	n=1.62	r >50	>66

1.3.4 ACTIVIDAD OPTICA Y EFECTO ELECTRO-OPTICO LINEAL

El efecto electro óptico lineal se expresa mediante la ley de variación de índice [19].

$$\Delta\left[\frac{1}{n^2}\right]_{ij}=r_{ij}E_K \tag{11}$$

$$\Delta\eta_m=r_{mK}E_K \tag{12}$$

puesto que $ij = ji = m$

Siendo n el índice de refracción y η el tensor de impermeabilidad, r_{mk} los coeficientes electro ópticos y E_K el campo eléctrico aplicado [19].

En un cristal cortado a $z45^0$ (configuración transversal), la diferencia de fase φ introducida por efecto electro-óptico lineal es

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} r_{41} n_0^{\ 3} \frac{e}{d} V \tag{13}$$

donde λ es la longitud de onda de la radiación utilizada , r_{41} es el coeficiente electro óptico, n_o es el índice de refracción para la longitud de onda utilizada, e es el espesor del cristal, d es la distancia entre electrodos y V es el voltaje aplicado.

La actividad óptica especificada (poder rotatorio), se expresa mediante

$$\rho = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n \tag{14}$$

el desfase introducido por la actividad óptica es:

$$\theta = 2e\rho \tag{15}$$

el desfase total introducido por efecto electro óptico lineal y por la actividad óptica natural es :

$$\psi = \sqrt{\theta^2 + \varphi^2} \tag{16}$$

$$\psi = e\sqrt{4\rho^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} r_{41} n_0 \frac{V}{d}\right)^2} \tag{17}$$

En la siguiente tabla especificamos el valor de la actividad óptica para distintas longitudes de onda, en distintos cristales de la familia silenita (BGO; BSO; BTO).

Tabla 2. Actividad óptica. [7]

Longitud de Onda λ	BSO Actividad óptica (°mm^{-1})	BGO Actividad óptica (°mm^{-1})	BTO Actividad óptica (°mm^{-1})
488nm	44	45	14
514nm	38	38	11
633nm	22	22	6

1.4 HOLOGRAMAS DE TRANSMISIÓN Y VOLUMEN

1.4.1 REGISTRO DE UN HOLOGRAMA

Cuando registramos un holograma en un cristal fotorrefractivo, debido a la interferencia de dos haces coherentes, se encuentra que el patrón de redes resultante presenta las características de un holograma de volumen [6,7].

Para dos ondas planas con intensidades I_1 y I_2, ver Figura 6 (a), tenemos que la intensidad resultante es: $I(x) = I_m(1 + M\cos(Kx))$ donde $I_m = I_1 + I_2$ es la suma de las intensidades y $M = 2\sqrt{I_1 I_2}/I_m$ la modulación, también se tiene que $K = 2\pi/\Lambda$, es la frecuencia espacial de las franjas y Λ es el espaciado de las franjas que viene dado por $\Lambda = \lambda_w/2nsen\theta_1$ ver figura 6, donde, λ_w es la longitud de onda de los haces de registro, θ_1 es la mitad del ángulo que forman los dos haces de registro en el interior del cristal, donde n es el índice de refracción del material.

Si tenemos en cuenta la ley de snell, entonces:

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2nsen\theta_1} = \frac{\lambda_w}{2sen\theta_2} \tag{18}$$

de esta forma Λ, el espaciado de las franjas, queda en función del semi-ángulo de registro que esta fuera del cristal. Entonces los dos haces incidentes crean un patrón luminoso que redistribuye las cargas fotoinducidas, creando así un campo de carga espacial E_e que posteriormente modulara el índice de refracción de la forma:

$$\partial n = n^3 rE = n^3 r\left[M(E_D sen(Kx) - E_A\cos(Kx) + E_a\right] \tag{19}$$

donde $E_A = V/L_Z$ es el campo eléctrico externo aplicado y $E_D = KD/\mu$ es el campo de difusión [14].

1.4.2 EFICIENCIA DE DIFRACCION

Cuando se propaga el haz de lectura a través del cristal, este se difracta a través de la red de índices y se reconstruye el holograma almacenado.

La eficiencia de difracción se define como: $\eta = I_D / I_T$, I_D es el haz difractado y I_T es el haz transmitido [6, 7].

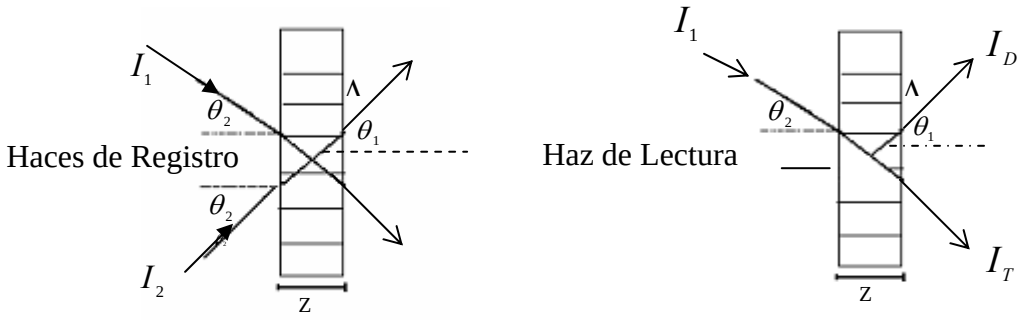
1.4.3 CONDICIÓN DE BRAGG

Para la holografía en volumen hay que tener en cuenta la interacción del rayo difractado con la red y debemos tener en cuenta la selectividad angular que alude a la condición de Bragg dada por:

$$2psen\theta_1 = \lambda_r \tag{20}$$

donde λ_r es la longitud de onda del haz de lectura y θ_1 es el semi-ángulo (dentro del material) dado entre el haz de lectura y la normal con la superficie del cristal y p es el espaciado de la red. La condición de Bragg nos da la dirección del haz de lectura de manera que se pueda observar el haz difractado [15-17].

En la Figura 6b se muestra la forma en que se reconstruye el holograma, de tal manera que la lectura se realiza con un haz cuya longitud de onda es mayor que el haz de registro.



(a) (b)

Figura 6. Hologramas de volumen,(a) para el registro y (b) para la lectura

2. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

2.1 TÉCNICA HOLOGRÁFICA CONVENCIONAL

La motivación de este montaje holográfico es el uso de un cristal fotorrefractivo como medio de registro, a diferencia de la fotografía speckle se tienen resultados en tiempo real.

2.1.1 PROCESO DE REGISTRO

Con un láser de Nd:YVO_4 de 532 nm, longitud de onda en el verde, se forma la onda plana mediante un filtrado espacial y una lente colimadora (figura 7), luego este rayo se divide al pasar por un divisor de haz (BS) que se dirige al espejo M y al difusor d. El registro holográfico se realizara en un cristal fotorrefractivo BGO de dimensiones 14,1mm x 10.65mm x 6.3mm, mediante el acoplamiento de dos ondas planas que provienen una del espejo M, que es el haz referencia y el otro el haz señal, en el que se forma la imagen de un difusor d al pasar por un sistema lente-pupila (L - P), en la primera exposición (holograma del difusor sin deformar). Después de tapar el haz láser se hará un pequeño desplazamiento en el difusor con un sistema de microdesplazamiento adaptado y se realizara un segundo registro en forma similar.

2.1.2 PROCESO DE LECTURA.

La lectura del patrón de interferencia almacenado después de las dos exposiciones del patrón de speckle se llevara acabo con el haz referencia que proviene del espejo M (ver figura 7), el cual se difracta por la red formada en el cristal fotorrefractivo. En el plano de Fourier de la imagen registrada en el cristal (doble exposición) debido a una segunda lente L', se observan las franjas interferométricas captadas por una cámara CCD y visualizadas en un monitor de el computador.

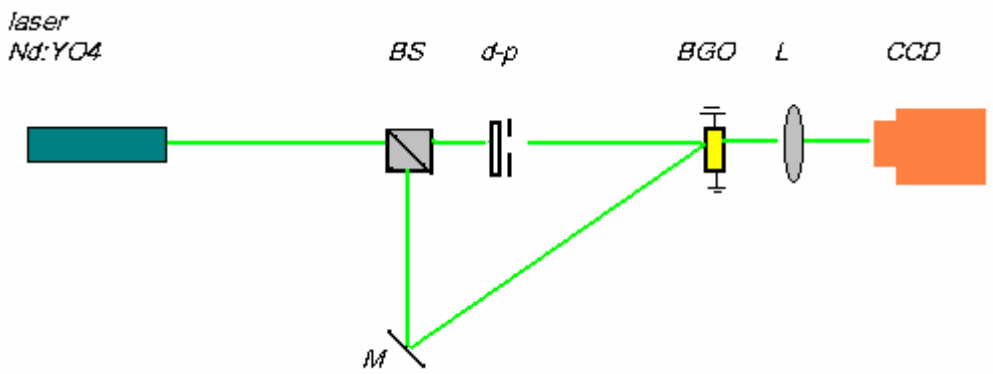


Figura 7. Esquema experimental para el registro y lectura por doble exposición.

Otro paso importante para el esquema holográfico es la implementación en el montaje anterior de un láser rojo Helio-Neon de 633nm en el proceso de la lectura del speckle en el cristal fotorrefractivo, figura 8, con una variación pequeña del ángulo de Bragg, dado por la ecuación $\lambda_r / \lambda_v = sen\theta_r / sen\theta_v$ entre 3-4 grados de diferencia con respecto al haz lectura verde. Así se puede observar las franjas de interferencia de una manera inmediata sin necesidad de obstaculizar el haz señal. También se observa comparativamente las franjas tanto en verde como en rojo y se aprecia como para distintas longitudes de onda el paso de la red queda afectado.

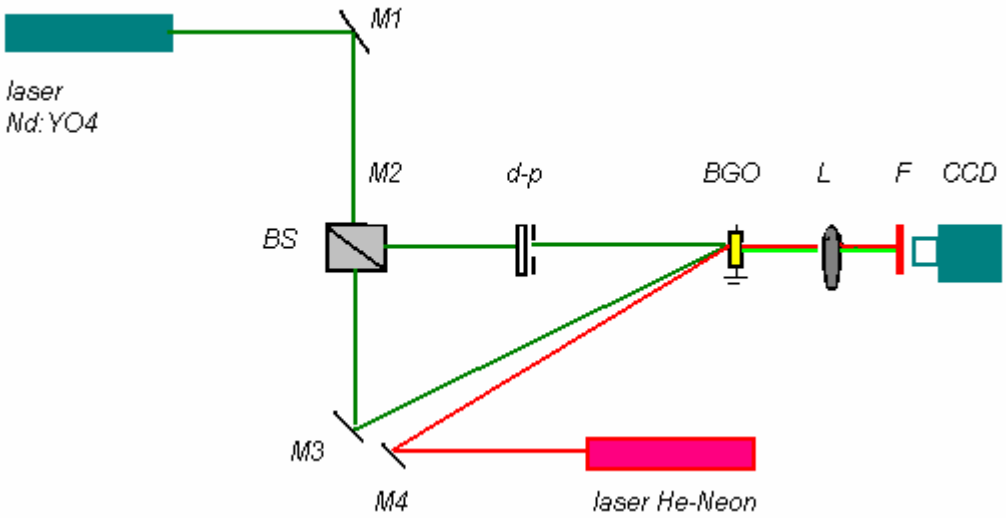


Figura 8. Esquema experimental para la lectura con láser rojo.

2.2 TÉCNICA DE SPECKLE MODULADO DOBLE APERTURA:

2.2.1. PROCESO DE REGISTRO

El patrón de speckle que se registra en el cristal BGO es la imagen del difusor d, formado por la lente *L* y la pupila *P* que consta de dos aberturas circulares (ver Figura 9).

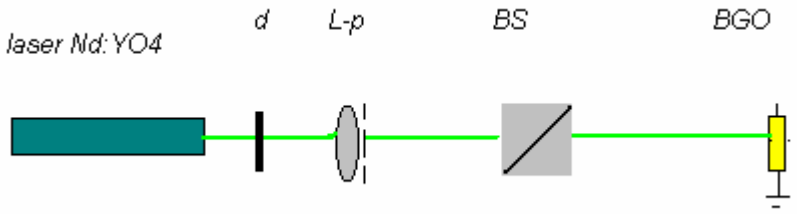


Figura 9. Esquema experimental: Registro.

La distribución de intensidad recibida por el cristal es $I(X,Y) = |A(X,Y)|^2$ donde la integral de Fresnel [18], para la propagación libre de una onda a esa distancia es para $A(X,Y)$ igual :

$$A(X,Y) = C\iint A_0(x_0,y_0)P(u,v)\exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda}\left[\left(\frac{x}{Z_0}+\frac{X}{Z_c}\right)u+\left(\frac{y}{Z_0}+\frac{Y}{Z_C}\right)v\right]\right\}dudvdxdy \qquad (21)$$

donde $C = 1/\lambda^2 Z_0 Z_c$, Z_0 es la distancia del difusor al sistema lente-pupila $P(u, v)$ y Z_C es la distancia del sistema lente-pupila al cristal. Se hace un doble registro en el cristal fotorrefractivo BGO para dos posiciones del difusor d al cual se le adaptara un mecanismo de microdesplazamiento.

2.2.2 PROCESO DE LECTURA

Con un láser de He-Ne de 633nm se realizara la lectura en el cristal (ver Figura 10), de tal manera que no afecte la fotoconductividad en el cristal. Con la lente L_2, en el plano de la CCD se obtiene una distribución de intensidad proporcional a la transformada de Fourier del haz difractado por el cristal BGO debido a la red de índices creada en el registro. La distribución de intensidad será entonces la auto-correlación de la función pupila del sistema que consta de tres distribuciones de

speckle, que son el orden cero y los dos órdenes laterales simétricos junto con las franjas interferométricas, estas representan un coseno cuya periodicidad dependerá del desplazamiento del difusor *d*.

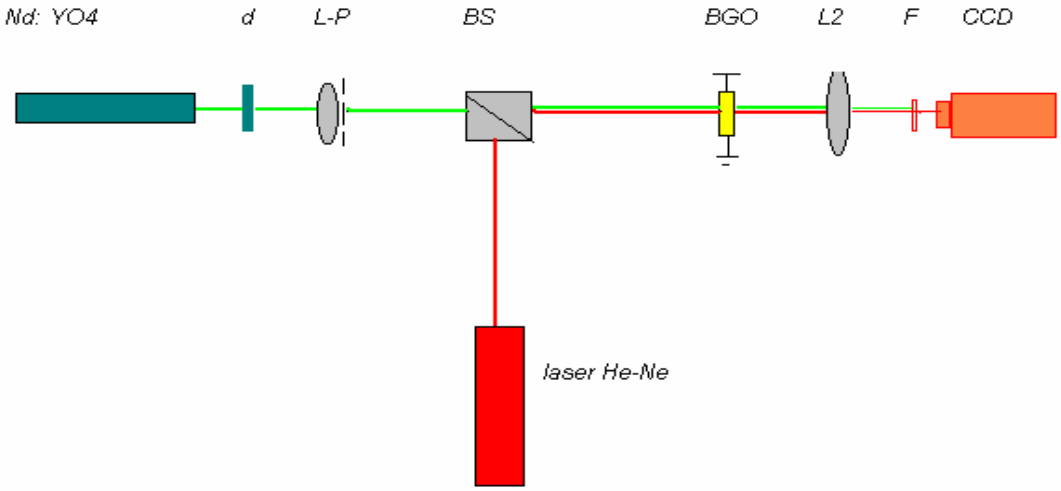


Figura 10. Esquema experimental: Lectura.

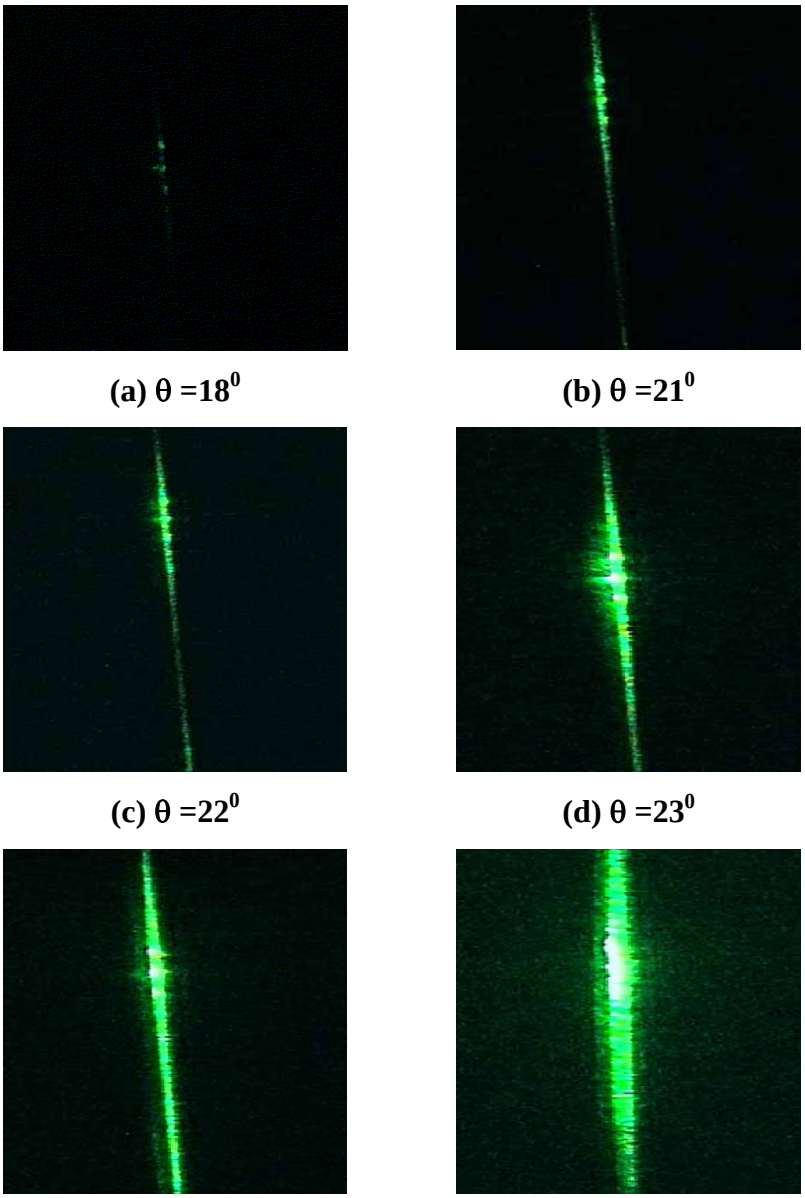
En ambos registros holográfico y por doble apertura, la distribución de intensidad generara foto-cargas en el cristal del tal forma que se crea una distribución de carga espacial. En este proceso participan los mecanismos de arrastre (drift) y de difusión. Se tiene en cuenta que para el registro con doble apertura se esperara una baja periodicidad de las franjas del orden de 20-30 líneas por milímetro y el mecanismo que predomina es el de arrastre de portadores de carga, mientras que en el de holografía convencional (doble exposición) predominará el mecanismo por difusión el cual es un registro a alta frecuencia. Así se tiene entonces que la distribución de intensidad genera una perturbación Δn en el índice de refracción del cristal, codificando de esa forma el registro.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 TÉCNICA HOLOGRÁFICA CONVENCIONAL:

3.1.1 EFICIENCIA DIFRACCIÓN CON RESPECTO A LOS ÁNGULOS DE REGISTRO.

Como análisis preliminar para considerar el registro de los patrones de speckles en el cristal fotorrefractivo, dentro de la configuración holográfica convencional, se parte de un estudio de la mayor eficiencia de difracción (sección 1.4.2) que tenga el haz de lectura con relación a los diferentes ángulos que forman los haces de registro en el cristal BGO con dimensiones . En las siguientes figuras (11(a), 11(b), 11(c) 11(d)) se observan las distintas imágenes en el plano de Fourier para dos ondas planas coodirecionales que llegan al cristal en la cara $<\bar{1}10>$ en régimen de transmisión. Desde 18° ,figura10(a), que es débil su eficiencia de difracción, esto porque tenemos que tener en cuenta que el espaciado de la red Λ (ecuación 18) aumenta si el ángulo de registro disminuye existiendo menos superficies especulares, luego al elevar los ángulos, figuras, 11(b),11(c),11(d) se observa que empieza a incrementarse la eficiencia hasta llegar a la máxima intensidad en 25^0 dentro de nuestra configuración, figura11(f), si se sigue aumentando el ángulo la eficiencia vuelve a decaer, esto sucede porque ya el espaciado de la red comienza a disminuir tanto que llega afectar los procesos de fotoexcitación de las cargas determinadas en un volumen a una intensidad dada, llegando a afectar la generación y recombinación de los portadores de carga en el cristal [21].



(a) $\theta = 18^0$ **(b) $\theta = 21^0$**

(c) $\theta = 22^0$ **(d) $\theta = 23^0$**

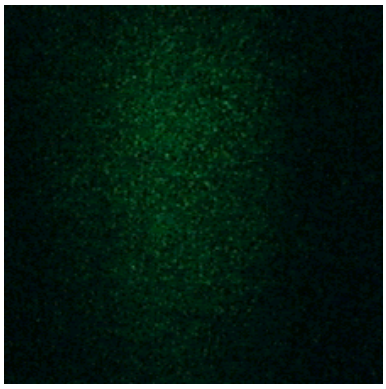
(e) $\theta = 24^0$ **(f) $\theta = 25^0$**

Figura 11. Eficiencia de difracción para el registro de ondas planas con diferentes ángulos.

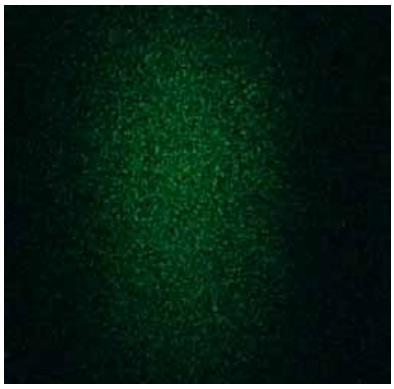
3.1.2 DIMENSIONES DEL PATRÓN DE SPECKLE CON RELACIÓN AL DIÁMETRO DE LA PUPILA.

Cuando variamos el diámetro D de las pupilas entonces cambiamos las dimensiones de los speckles (ver sección 1.1.2) tanto en su diámetro como en su longitud promedio, de modo que observaremos el efecto en el volumen de los granos; La variación de la pupila permite formar speckles con longitudes mayores

o menores que el tamaño (espesor) del cristal y partiendo de la hipótesis que la longitud del speckle constituye el espesor de la red fotorrefractiva [20], entonces la eficiencia de difracción debería permanecer constante si modificamos solo el diámetro de las pupilas siempre que esta sea mayor que el tamaño del cristal, en caso contrario la eficiencia bajara. En las siguientes imágenes, figuras 12(a), 12(b), 12(c), 12(d), 12(e), se observa la variación del tamaño del grano del speckle con el diámetro de la pupila, el tamaño del grano es mas definido para D=8mm, D=10mm, D=14mm , cuando aumentamos el diámetro de la pupila disminuimos la longitud del speckle y se modifican las redes fotorrefractivas de tal manera que decrecen las superficies especulares(el franjeado interno en los granos) y la reflexión de Bragg por lo tanto se convierte en luz dispersada en muchas direcciones, ver figura 12(e) con D=25mm, perdiéndose eficiencia de difracción y definición(tamaño del grano), también por esto es mayor en intensidad.

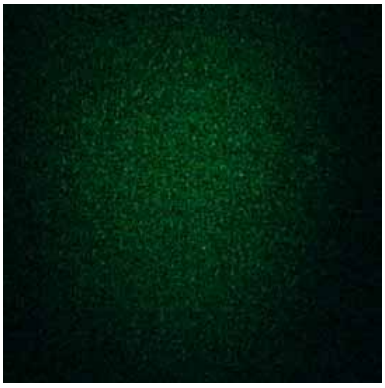


(a) D=8mm

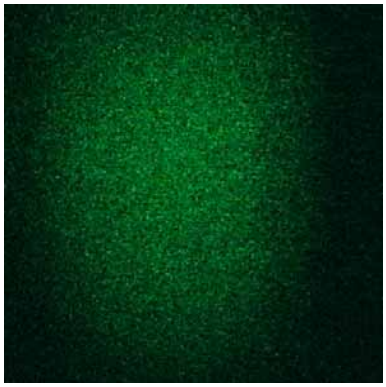


(b) D=10mm

(c) D=14mm



(d) D=18mm



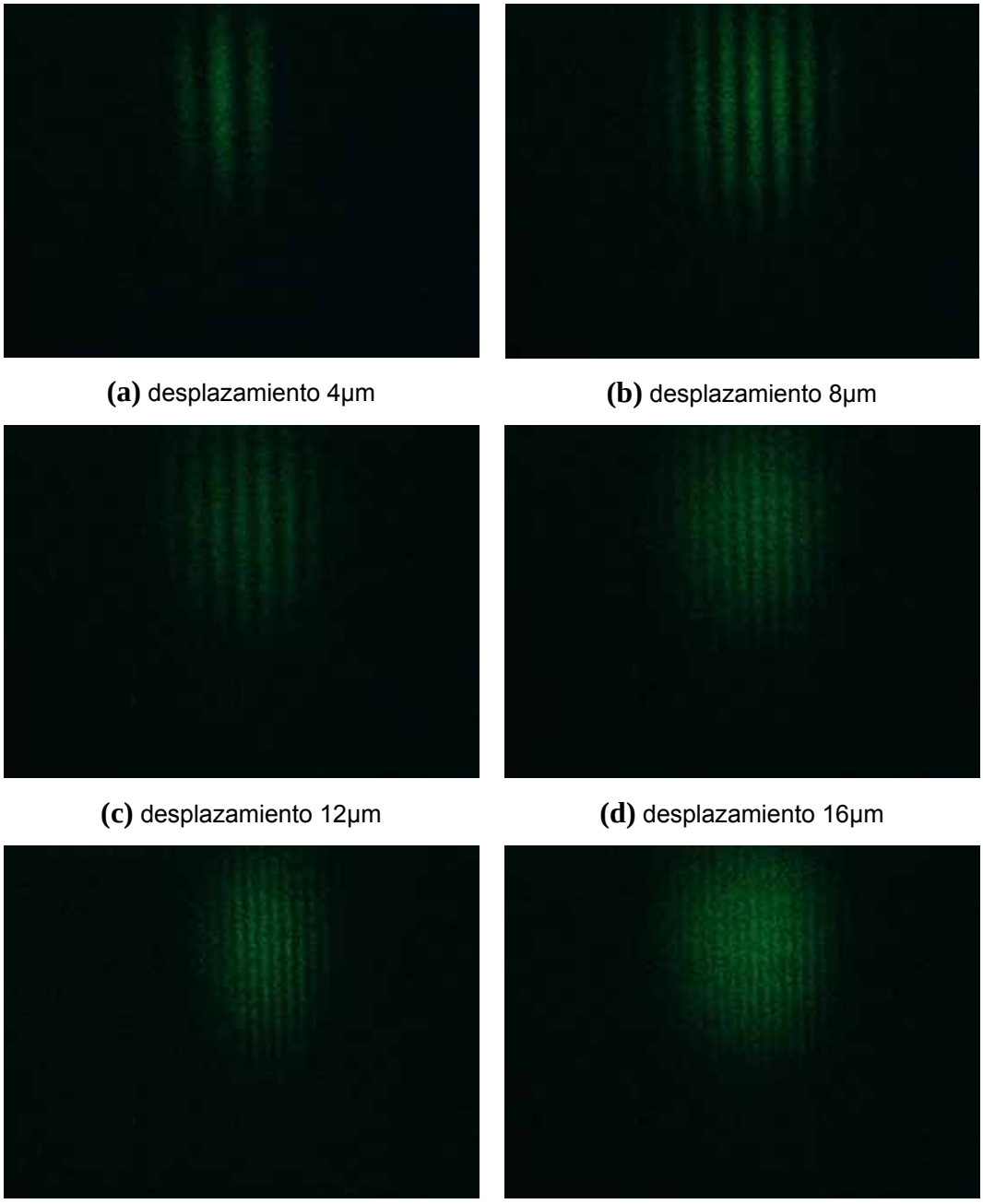
(e) D=25mm

Figura 12. Tamaño del speckle con el diámetro de pupila.

3.1.3 FRANJAS DE INTERFERENCIA POR DOBLE EXPOSICIÓN PARA DISTINTOS DESPLAZAMIENTOS EN EL PLANO.

De acuerdo a los anteriores parámetros analizados, se fija un ángulo apropiado de registro en el cristal y un tamaño del speckle (variando el tamaño de la pupila), ahora miraremos como dichos factores contribuyen a una buena respuesta energética (eficiencia de difracción) para observar en este caso un conjunto de franjas interferométricas haciendo pequeños desplazamientos en el plano difusor.

Para la obtención de las siguientes franjas, ver figura 13., se parte de un ángulo e Bragg y diámetros de aberturas apropiado, de tal forma que mejora la visibilidad y el buen contraste. Los resultados se dieron para ángulos de registro de 25^0 y diámetros de pupila de 14mm. El sistema para holografía convencional, Figura 7., mantuvo un rango de sensibilidad entre 4-25μm en el desplazamiento difusor, fuera de este rango las franjas no logran definirse, menores que 4μm el paso de las franjas es muy grande, figura 12(a), y mayores que 25μm ya el paso es tan fino, muy pequeño, figura 12(f), que pierde definición y el sistema no lo resuelve, esto debido a las limitaciones del sistema impuesto por la resolución del cristal fotorrefractivo, caracterizado por sus parámetros de cinética de grabado, dado por las capturas de la cargas fotoexitadas por parte de las trampas , movilidad, etc. [21], y la cámara CCD que es una JVC la cual tiene 768x494 píxeles efectivos, con tamaño de píxel alrededor de $10x7\mu m^2$(catalogo cámara JVC profesional ,ref. TK-1270u)



(a) desplazamiento 4μm **(b)** desplazamiento 8μm

(c) desplazamiento 12μm **(d)** desplazamiento 16μm

(e) desplazamiento 20μm **(f)** desplazamiento 25μm

Figura 13. Franjas de interferencia por doble exposición.

3.1.4 FRANJAS DE INTERFERENCIA POR DOBLE EXPOSICION CON HAZ DE LECTURA ROJO

Estos resultados son bastante interesantes para esta arquitectura, ver figura 14, ya que se obtuvo respuesta difractiva del speckle con otro haz de referencia distinto al verde dentro del mismo cristal, de modo que el proceso de lectura de la red holográfica sea con menor tiempo, ya que en este caso no tenemos que obturar el haz señal para la correspondiente lectura.

Se puede ver en la figura 14 los dos ordenes difractados tanto para el haz verde como para el rojo, se tiene que tener en cuenta que el ángulo de lectura para el haz rojo esta dado por la relación $sen\theta_B = \lambda_R / \lambda_w sen\theta_0$ para mantener la condición de Bragg, siendo θ_0 el semi ángulo formado por los dos haces de registro, λ_w la longitud de onda de los haces de registro y λ_R el de lectura. Si el ángulo de registro es de $\theta_0 = 25.4^\circ$ entones el ángulo de lectura para el haz rojo esta dado por $\theta_B = 30.77^\circ$

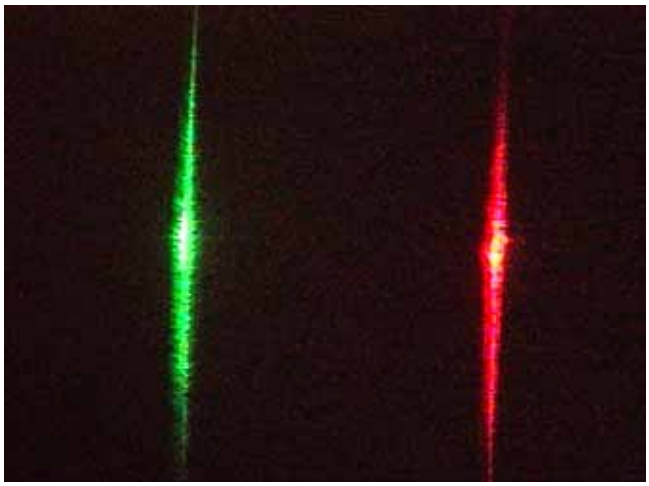


Figura14. Doble Difracción verde y rojo

Partiendo de un buen resultado para la difracción en la red holográfica con las ondas planas, se procede a realizar entones con la lectura, pero esta vez con el patrón de speckle registrado. La figura 15 muestra la lectura del patrón de speckle, tanto con el haz referencia verde como con el rojo, se aprecia en la figura que el

patrón de speckle cuya lectura se hace con el haz rojo es mas angosto, esto debido al alejamiento angular con relación a los haces de registro y al tamaño del frente de onda plana.

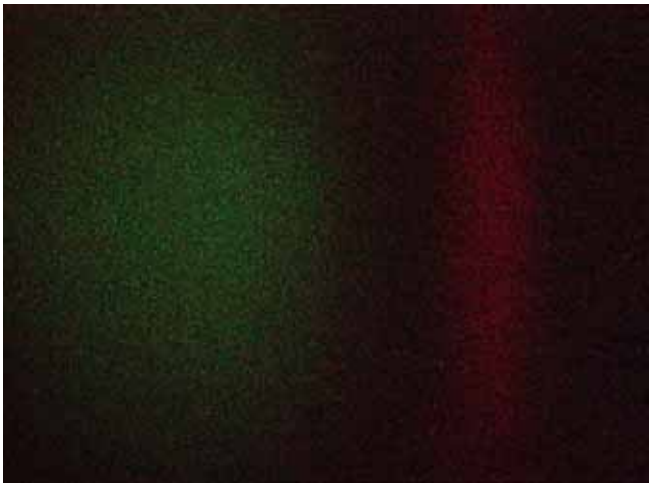


Figura 15. Doble lectura de Speckle

Las figuras 16 y 17 muestran las franjas interferometricas como resultado de la doble exposicion para un corrimiento del objeto difusor, el haz rojo está fuera de la region de fotoconductividad de tal manera que no afecta el proceso de registro, en este caso es interesante ver como el paso de las franjas interferométricas cambia con la longitud de onda del haz de lectura, que en este caso es el rojo, esta situacion es debido al desfase que sufre la onda al atravesar el material(cristal).

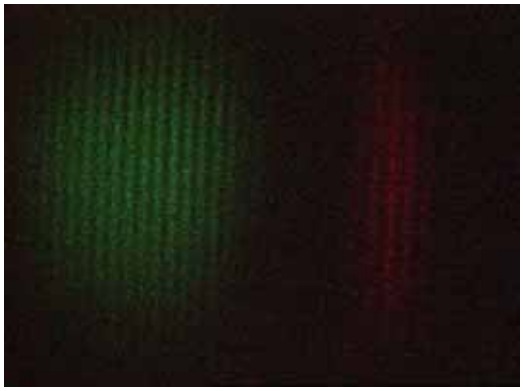


Figura 16. Doble franja para 24μm

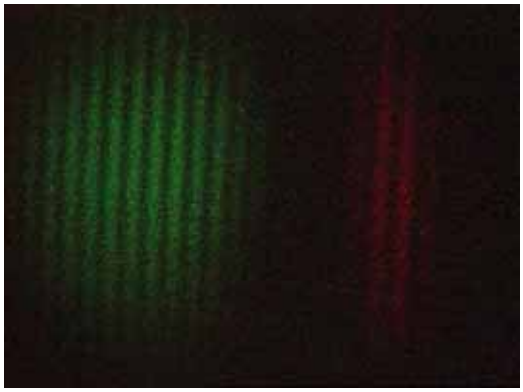
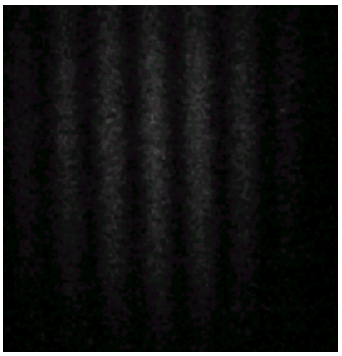


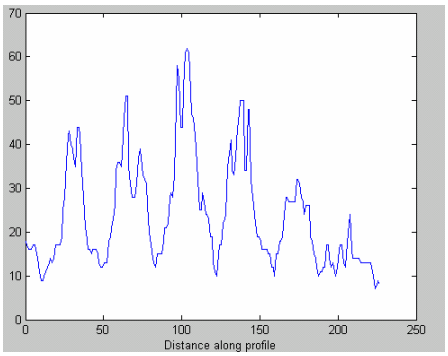
Figura 17. Doble franja doble 16μm

Las siguientes imágenes, figura 18 nos muestran lo perfiles de intensidad para un corte horizontal para tres sistemas de franjas interferométricas con distintos desplazamientos del difusor ver figuras 18(b),18(d),18(f), las figuras 18(a),18(c),18(d) fueron pasadas por un filtro mediana de tal forma que se

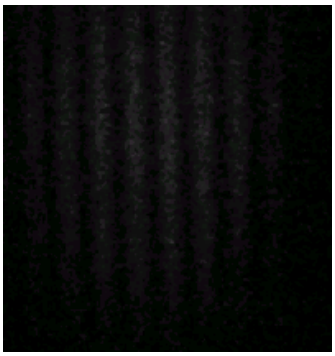
redujera un poco el efecto estocástico del speckle y se apreciara mejor el contraste de las franjas. En este caso los perfiles de intensidad quedan mas definidos, apreciándose pocas fluctuaciones para los picos en las intensidades máximas, se observa que la intensidad mínima trata de mantenerse casi constante mientras que la intensidad máxima se reduce a medida que nos vamos hacia los extremos, figuras 18(b),18(d),18(f), esto debido a la naturaleza gaussiana de la distribución de intensidad del speckle.



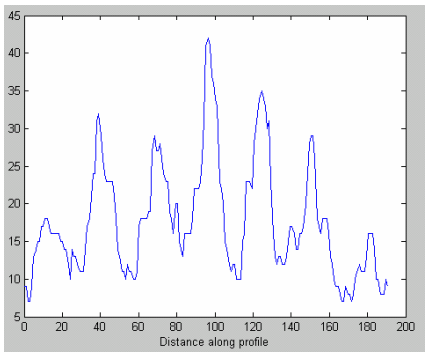
(a) franjas interferometricas



(b) perfil de intensidad

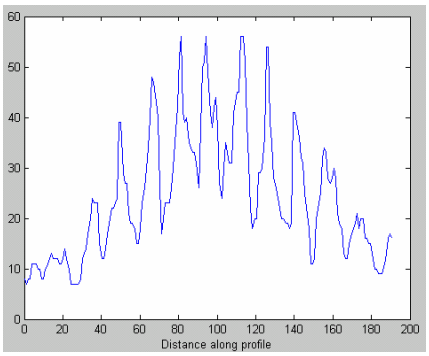


(c) franjas interferometricas



(d) perfil de intensidad

(e) franjas interferometricas



(f) perfil de intensidad

Figura 18. Perfiles intensidad

3.2 TÉCNICA DE DOBLE ABERTURA

3.2.1 SELECTIVIDAD DE LOS REGISTROS DE LOS SPECKLES MODULADOS

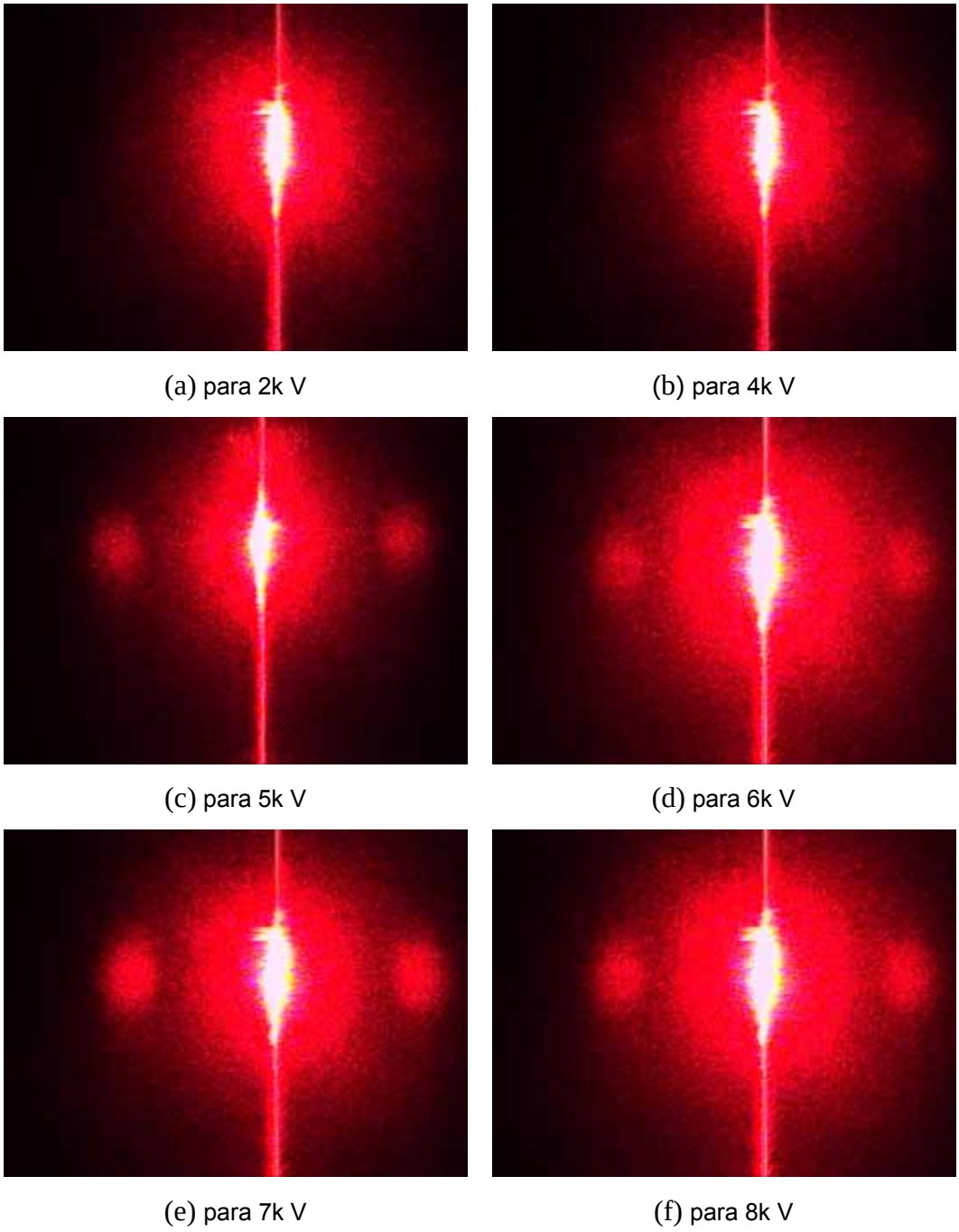
El tamaño del speckle imagen en profundidad esta dado por la ecuación $\partial z \approx 4 z^2 \lambda / D^2$ donde $Z_c = 500mm$ es la distancia imagen, si $D = 2.4mm$ es el diámetro de la abertura y $\lambda = 532nm$ la longitud de onda de la radiación incidente, en este caso caso la dimensión del speckle son: en longitud de $9{,}23mm$ y el ancho del speckle es $\partial t \approx z\lambda / D \approx 0.13mm$. El periodo espacial de las franjas es $p = Z_c \lambda / d = 0{,}026mm$ donde $d = 10mm$ que es la distancia entre aberturas, y el número de líneas por grano es aproximadamente $d / D = 4.16$, ver figura 19.

Figura 19. Speckle modulado.

3.2.2 DEPENDENCIA DE LA EFICIENCIA DE DIFRACCION CON EL CAMPO APLICADO.

Habíamos dicho en nuestra descripción experimental, (sección 2.2.2) sobre la baja frecuencia de la red fotorrefractiva en la técnica doble abertura, por esta razón el mecanismo predominante es el de arrastre de portadores de carga, donde el campo eléctrico externo aplicado es un factor importante a la hora de la formación del campo de carga espacial, este a su vez determina la profundidad de la red fotorrefractiva (ver ecuación ecuación (19)) incrementando por lo tanto la eficiencia. En las siguientes imágenes, figura 20, observaremos como la eficiencia de difracción crece para distintos valores cuando se incrementa el valor del campo. Para un voltaje nulo la extinción (polarizadores cruzados) no permite ver la difracción. Cuando el voltaje es 2Kv ya empieza la difracción a apreciarse, ver

figura 20(a), incrementándose hasta que los dos halos de difracción laterales se ven claramente definidos, figura 20(f), después de 8Kv las propiedades dieléctricas del medio no resisten la fuerte ionización del aire cuando se trabaja con potenciales superiores, produciéndose por lo tanto fuertes arcos de descarga.



(a) para 2k V (b) para 4k V

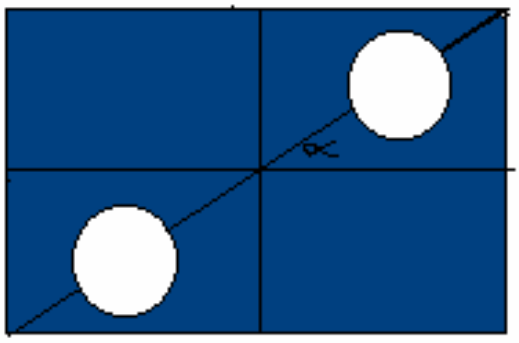
(c) para 5k V (d) para 6k V

(e) para 7k V (f) para 8k V

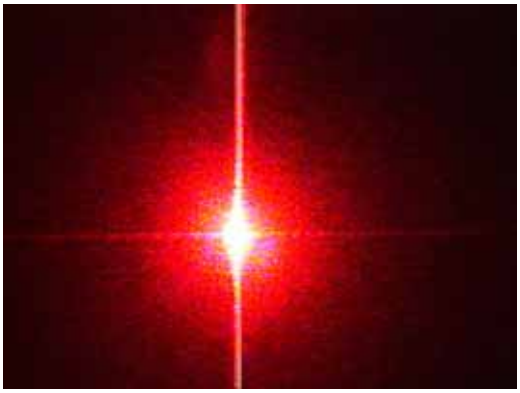
Figura 20. Eficiencia de difracción con el campo aplicado.

3.2.3 EFICIENCIA DE DIFRACCIÓN PARA DISTINTOS VALORES DEL ÁNGULO α

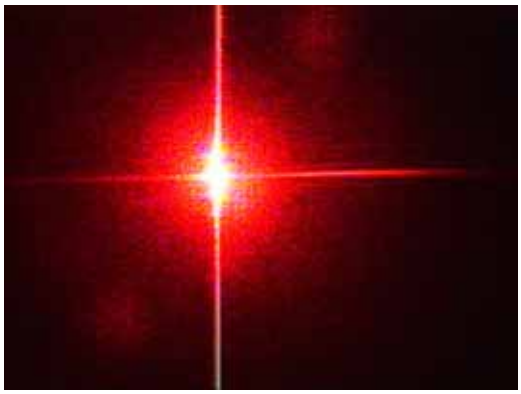
α Es el ángulo que forma la línea que une los centros de las aberturas y el eje horizontal figura 21(a). El vector de red $K = 2\pi / \Lambda$ (ver sección 1.4.1) es perpendicular a las franjas que modulan los speckles, este vector es paralelo a las líneas que unen los centros de las aberturas, entonces se puede ver en las siguientes imágenes para un voltaje aplicado de 8Kv, figura 21, como los ordenes difractados aumentan en intensidad a medida que la rotación de α se acerca a la línea horizontal. Cuando es 90^0, figura 21(b), la eficiencia de difracción es nula y si el ángulo es 0^0 la eficiencia es máxima, figura 21(f), en esta figura hacemos una doble exposición, pero hagamos enfoque en la clara difracción de los halos, fenómeno que se interpreta por el mecanismo de arrastre de cargas en el proceso de formación de la red de índices, donde la componente del campo eléctrico aplicado paralela a el vector K es la que mas contribuye.



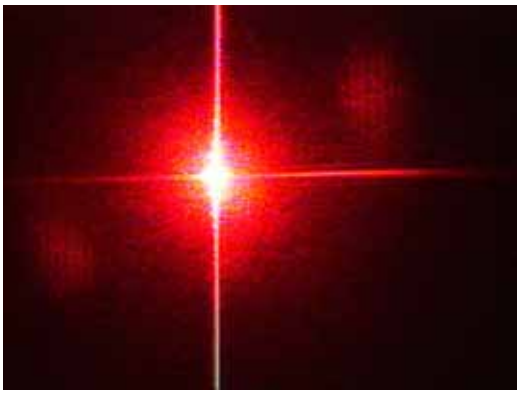
(a)



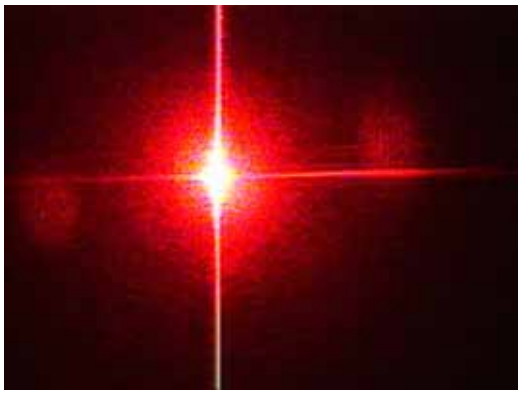
(b) α=90°



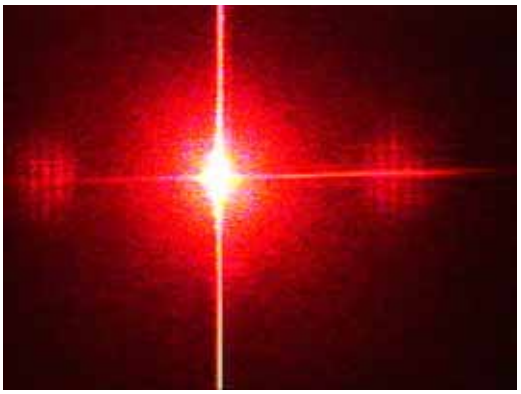
(c) α=75°



(d) α=45°



(e) α =10°

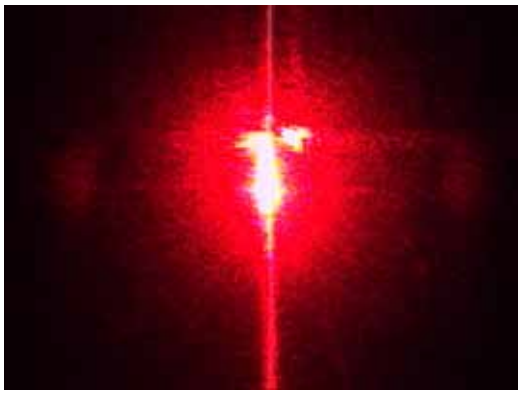


(f) α =0°

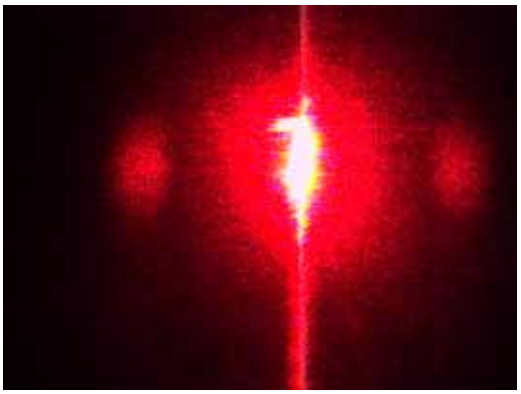
Figura 21. Eficiencia de difracción con respecto a la orientación- pupila.

3.3.3 EFICIENCIA DE DIFRACCION CON RESPECTO A LA LINEA QUE UNE LAS ABERTURAS

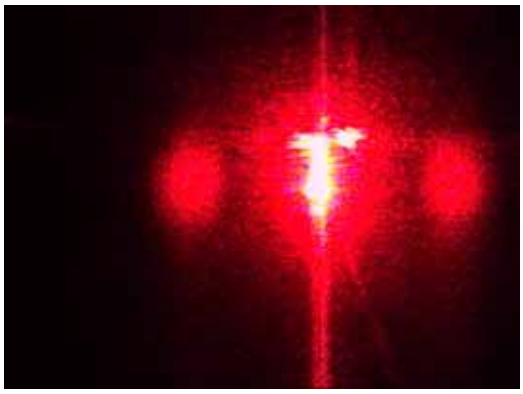
Tenemos que tener en cuenta que la distancia d que separa las aberturas determina la periodicidad de la red fotorrefractiva Λ, (ver sección 1.4.1) y el ángulo formado por los haces de registro $2\theta_0 \approx d / Z_c$, como también $\Delta\theta$ respecto al ángulo de Bragg [20]. En la figura 22(a), 22(b), 22(c) se observan tres patrones de difracción para un mismo registro en condiciones de lectura diferentes para distintas distancias d y a un voltaje de 8kv, como se puede observar, la eficiencia de difracción del haz lectura decrece si esta separación aumenta, desde luego esto sucede porque el parámetro off-Bragg aumenta [6], es decir se aleja del ángulo de Bragg.



(a) d= 14mm



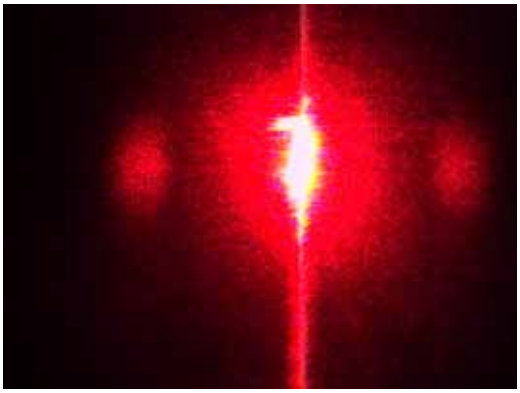
(b) d= 12mm



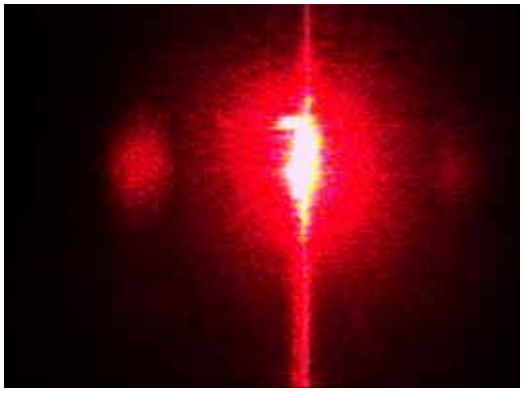
(c) d= 10mm

Figura 22. Eficiencia de difracción con respecto a la separación de aberturas.

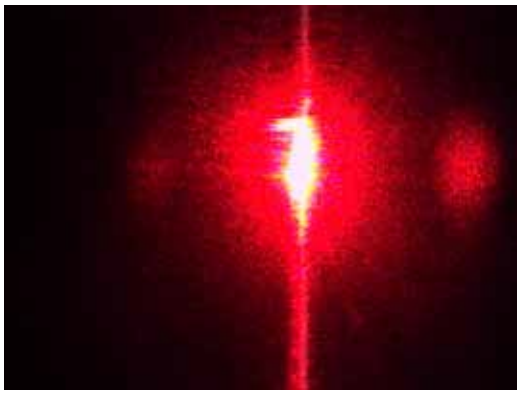
Ahora el ángulo de Bragg de registro: $\theta \approx \frac{d}{2Z_C}$ y el de la lectura es $\Delta\theta = \frac{\lambda_R}{\lambda_r}\frac{d}{2Z_c}$ si $\Delta\theta=\theta_B$ que es el apartamiento de la condición de Bragg [20], en este caso la reconstrucción es bajo incidencia normal. Entonces para diferentes orientaciones del haz de reconstrucción, figura 23(a), figura 23(b), figura 23(c) con tenemos que cuando este se dirige en dirección del ángulo de Bragg aumenta la intensidad de difracción para uno de los ordenes difractados (± 1), sin embargo si este se dirige perpendicularmente al cristal, figura 23(a), la lectura de cada orden difractado se realiza fuera de la condición de Bragg, disminuyendo en este caso la eficiencia de difracción.



(a) $\Delta\theta=\theta_B$



(b) $\Delta\theta=0$

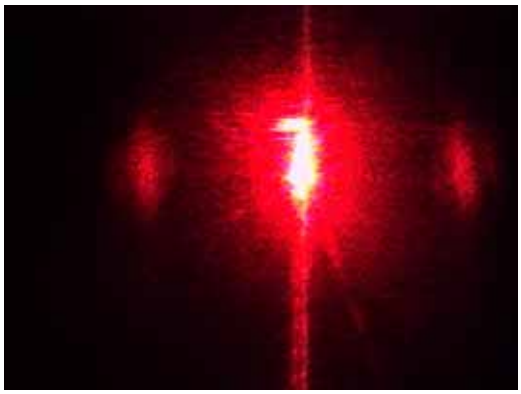


(c) Δθ=0

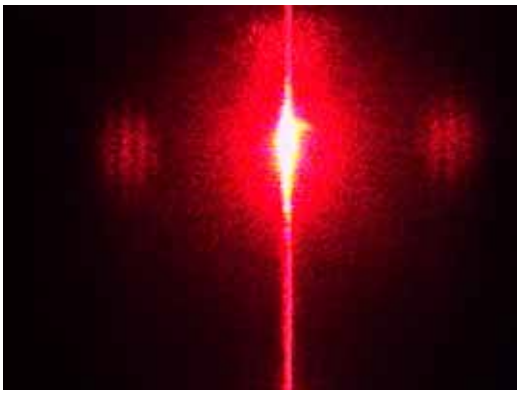
Figura 23. Eficiencia de difracción con la orientación de haz lectura.

3.3.4 FRANJAS DE INTERFERENCIA POR DOBLE EXPOSICION PARA DISITINTOS DESPLAZAMIENTOS EN EL PLANO

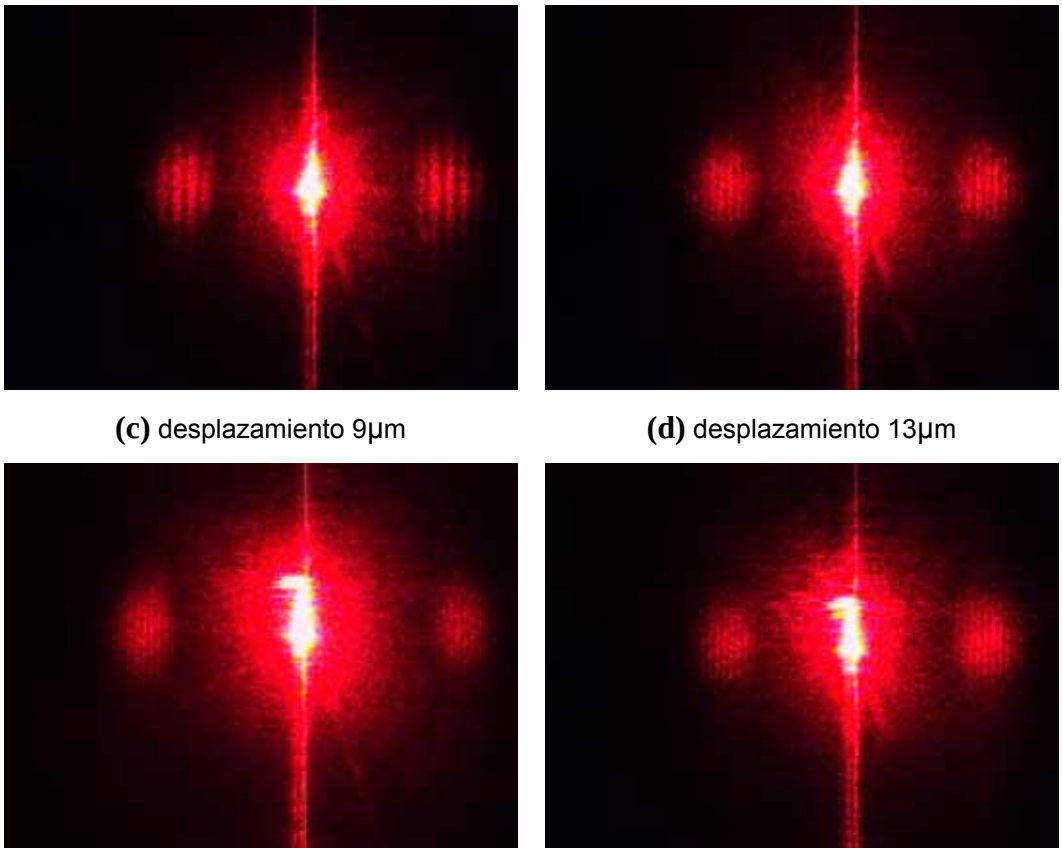
Las siguientes imágenes (figura 24), nos muestran las franjas interferométricas como resultado de la doble exposición, para dos posiciones distintas del objeto difusor. La lectura se hace en tiempo cuasi real con el haz de lectura rojo. Como podemos ver, las siguientes figuras muestran la distribución de intensidad en el plano de Fourier, con pupila de diámetro, D=3.5mm, separación de aberturas de d =10mm y voltaje aplicado de 8Kv.



(a) desplazamiento 3μm



(b) desplazamiento 7μm



(c) desplazamiento 9µm **(d)** desplazamiento 13µm

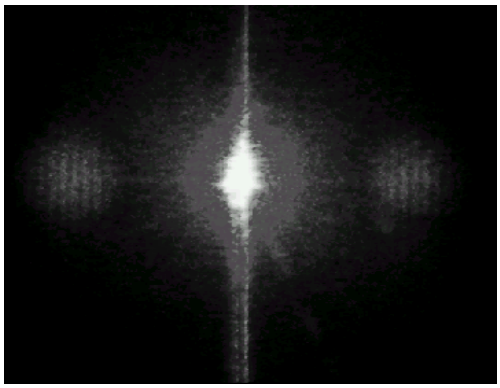
(e) desplazamiento 15µm **(f)** desplazamiento 18µm

Figura 24. Franjas de interferencia-doble exposición.

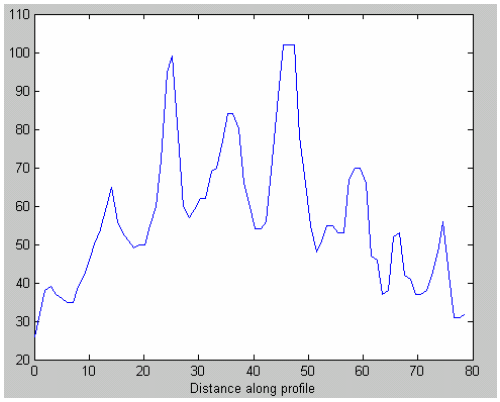
Para la figura 24(a) vemos que el desplazamiento del difusor es tan pequeño que las franjas en este caso poseen un paso muy grande (ver sección 1.2), a diferencia de las figuras 24b), 24(c), 24(d), que define un buen contraste y una definición clara de las franjas, para las dos ultimas, figura24(e), 24(f) el desplazamiento del difusor es considerablemente mayor(de 16 a 18 micrómetros) de tal manera que el paso de las franjas es muy fino y por lo tanto no logra definirse, se tiene que tener en cuenta como en el caso de la holografía convencional que el cristal mantiene también una resolución limitada por sus propiedades físicas y la cámara a su vez tiene también un margen de resolución dada por la distancia entre píxeles.

La figura 25(a) muestra los dos halos de difracción para una doble exposición con desplazamiento del difusor de 13µm, la imagen está en nivel de gris con tamaño de pupila D=3.5mm, distancia entre aperturas de d=10mm y voltaje aplicado de

8Kv, y la figura 25(b) es un perfil de intensidad de el halo de difracción (-1), como podemos ver, también se aprecia la variación de los máximos de intensidad, decreciendo este en los extremos, debido a la distribución de intensidad del speckle gaussiano, ahora las pequeñas variaciones entre picos es debido a las altas frecuencias dadas por el speckle, en este caso seria tratar de buscar filtros o métodos de procesamiento de imágenes que aporten mas al suavizado.



a) Halos de difracción en nivel de gris



b) Perfil de intensidad

Figura 25. Perfil de intensidad doble-abertura

4. CONCLUSIONES

En primera instancia se considera que la revisión del estado del arte en los aspectos físicos relacionados con el desarrollo del presente trabajo contribuyeron en forma significativa a un mejor entendimiento de los fenómenos físicos involucrados en el desarrollo experimental realizado, en el Capítulo 1 se hizo un breve resumen de la teoría consultada, estudiamos las propiedades fundamentales de los patrones de speckle analizando su formación como resultado de la interferencia de una multiplicidad de ondas de amplitud y fases aleatorias, se presto especial atención a la definición del tamaño promedio y la naturaleza en volumen del speckle. Por ser este fenómeno aleatorio y de muchas contribuciones, revisamos brevemente su tratamiento estadístico; y también se estudio la formación de franjas de interferencia por doble exposición de patrones de speckle por desplazamiento en el plano. Pasando después al efecto fotorrefractivo se destaca en primera instancia su origen accidental en investigaciones sobre generación de segundo armónico, hoy sabemos que son materiales electro-ópticos, fotoconductores y no lineales. La variación de índice de refracción se produce con luz de baja intensidad cuando se trata particularmente con cristales tipo silenitas como el BGO (con el cual se trabajo), se conocen sus descripciones físicas que permite determinar muchas de las propiedades ópticas y dieléctricas, por ultimo se estudia la formación de hologramas en medios de volumen en cristales fotorrefractivos en régimen de transmisión, destacando la selectividad angular de registro y la condición en la lectura.

De los resultados experimentales podemos destacar:

En el esquema de holografía convencional se usa como medio de registro del speckle un cristal fotorrefractivo, que a diferencia de las emulsiones holográficas (donde se hace procesado de revelado) el registro es en tiempo real. Se aplican distintos ángulos de registro y se cambia el tamaño de las pupilas para variar las dimensiones del speckle, se ajustan estos parámetros con las condiciones de espacio manejado en el esquema experimental, así se obtienen respuestas optimas con la lectura del speckle en el cristal, una vez establecidos estos

parámetros, se realiza el registro de la doble exposición, para dos posiciones del objeto difusor (micro-desplazada una posición respecto a la otra) para obtener las correspondientes franjas interferometricas, las que alcanzaron buena calidad y contraste, logrando así fijar las mejores condiciones del registro en esta configuración. En el curso del proceso experimental, la formación de la red fotorrefractiva se dio en régimen de difusión, sin necesidad de aplicar campo eléctrico externo ya que las franjas presentes en el cristal fueron de alrededor de 400-600líneas/mm, así los portadores de carga pueden ir fácilmente de las zonas brillantes a las oscuras en el proceso de formación de la red de índices.

Para el esquema de doble apertura se estudia las distribuciones de speckle formado por sistemas ópticos con una pupila de doble apertura y registros en un cristal fotorrefractivo, se tuvo en cuenta también la naturaleza en volumen de tales registros, observamos como la formación de la red fotorrefractiva depende mucho del campo externo aplicado. En este método predomina el mecanismo de arrastre de cargas porque los electrones en este caso tienen que hacer un mayor recorrido, las franjas en el cristal son del orden de 20-40líneas/mm, frecuencias bajas comparadas con el esquema holográfico convencional. Se Investiga y se aprecia experimentalmente también que la eficiencia de difracción depende del campo aplicado y de la orientación de las franjas de interferencia en el cristal con el campo, estos factores influyen en la modulación de la red fotorrefractiva. Otros factores importantes que influyen en la eficiencia de difracción están el alejamiento angular del haz de lectura respecto de la condición de Bragg y la separación de las aberturas. Teniendo en cuenta entonces todos los parámetros antes mencionados para obtener respuestas óptimas en el registro y la lectura del speckle en el cristal se hizo la doble exposición por microdesplazamiento para obtener las correspondientes franjas interferometricas, resultados en donde también se alcanzo buena calidad y contraste.

Ya para finalizar se puede decir lo siguiente de los dos esquemas experimentales que se implementan:

En el esquema holográfico convencional se trabaja en régimen de difusión con el cristal fotorrefractivo, por lo tanto no se aplico campo externo al cristal, que en

parte lo hace mas sencillo sin el uso de fuentes de voltaje, este esquema es mas propenso a vibraciones mecánicas por manejar mayor espacio, pero también es una ventaja a la hora de implementar sistemas ópticos formadores de imágenes complejos. En el esquema de doble apertura si trabajamos con campo aplicado pero es un sistema más compacto donde está menos sujeto a inestabilidades, es mas sencillo porque se hace el registro con el mismo frente de onda que pasa por las dos aberturas.
En ambos sistemas la sensibilidad analizada fue sólo para desplazamientos en el plano, alcanzando mediciones del orden de 4-25 micras para el holográfico y para el caso de doble apertura se dio entre 4 -16 micras, cabe decir que con el haz de lectura rojo las franjas interferometricas cambian el paso debido a la condición de Bragg en la lectura del cristal, esta depende de la longitud de onda.

Se considera que la totalidad de los objetivos propuestos para el desarrollo de este trabajo se cumplieron satisfactoriamente, a pesar de las dificultades experimentales y detalles inesperados, cabe decir que el esquema propuesto para la holografía convencional fue modificado por problemas con la sensibilidad del sistema de adquisición, ya que la energía recibida por la cámara CCD era muy baja, por tal motivo se trabajo con propagación de speckle objetivo.

Estas técnicas se pueden emplear en aplicaciones de metrología en tiempo real, para medidas de estrés, deformaciones, análisis de vibraciones, expansión térmica, etc., estas aplicaciones son de vital importancia para el seguimiento del control de calidad de estructuras, además que brindan ensayos no destructivos.
Después de definir todos los parámetros que dieron cabida al cumplimiento de los objetivos en este trabajo grado queda abierta la posibilidad de continuar con proyectos que brinden la posibilidad de una posterior aplicación en metrología.

BIBLIOGRAFÍA

[1] D. E. Duffy, ‘’Moiré Gauging of in-plane displacement using double aperture imaging’’, Appl. Opt. **8**, 1778 (1972).

[2] G.Cloud ‘’Practical speckle interferometry for measuring in-plane deformation’’, App. Opt. **14**, (1975) 878.

[3] M.Françon, *Laser speckle and applications in optics*, Academic Press, New York (1979)

[4] R. Erf , *Speckle metrology*, Academic Press, New York (1978).

[5] Il. Laszlo Z Fuzessy J. Gyimesi, ’’Comparitive measurement by speckle interferometry using holographically reconstructed master object’’, Opt. Eng., **36** (2), 3323-3326 (1997).

[6] J.V. Álvarez Bravo, Tesis Doctoral: *Almacenamiento Holográfico de la información en materiales fotorrefractivos: condiciones experimentales*. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid (1995).

[7] P. Yeh, *Introduction to photorefractive nonlinear optics*, John Wiley & Sons, New York (1993).

[8] Yariv A. and Yeh. P., *Optical waves in crystal, Propagation and control of laser radiation*, USA: John Wiley & sons Inc., New York (1984).

[9] Teich, M. and Saleh, *Fundamental of Photonics*. J Willey and sons, New York (1991).

[10] M. Tebaldi, L. Angel, M. Trivi, N. Bolognini ‘’Phase-object detection by use of double-exposure fringe-modulated speckle patterns’’, J. Opt. Soc. Am. A **20**, 107-119, (2003).

[11] M. Tebaldi, L. Angel, M. Trivi, N. Bolognini ‘’Speckle photography with different pupils in a multiple-exposure scheme’’, J. Opt. Soc. Am. A **20**, 116-129, (2003).

[12] J. Ohtsubi and T. Asakura, ‘’Statistical properties of laser produced in the diffraction field’’, Appl. Opt. **16**, 1742 (1977).

[13] J.C Dainty, *LASER SPECKLE and Related Phenomena*, Topics in applied physics, John Wiley & Sons, New York, (1991).

[14] Pepper D. M., Feinberg J., Kukhtarev N. V., ‘’The Photorrefractive effect’’, Scientific American, **263**, (4). 34-40. (1990).

[15] M. Tebaldi, L. Angel, M. del C. Lasprilla and N Bolognini, ‘’Image multplexing by speckle in a BSO crystal’’. Opt. Común.. **155**, 342, (1998).

[16] J. P. Huignard and J. O. Herriau, ¨Real time double exposure interferometry with BSO crystals in transverse electrooptic configuration¨, Appl. Opt. **16**(7), 1807-1809 (1977).

[17] A. A. Kamshilin and E. V. Mokrushina, ¨Photorefractive crystal for real-time holographic interferometry¨, *Proc. SPIE* **473**, 83-86 (1984).

[18] Goodman, J. *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, (1996).

[19] Chia-Lun H., 1967, ‘’Linear electro-optic retardation schemes for the twenty classes of linear electro-optic crystals and their applications’’, **J. Appl. Phys. 38**,(2650-2654).

[20] Kogelnik H., ‘’Coupled wave theory for thick hologram gratings’’, Bell Sist. Tech. J., **48**, 2909-2947,1969.

[21] J.F. Nye*, Physical properties of crystals*, clarendon press, Oxford,(1998).

[22] G. C. Valley and M. B. Klein, ‘’Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing’’, , Opt. Eng., **22** (6), 704-711(1983).