

CARACTERIZACIÓN DE UNA PANTALLA LCD EN EL INFRARROJO

M. Goldin, G. Díaz Costanzo y S. Ledesma

Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI). Departamento de Física "Juan José Giambiagi"

- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires - Pabellón I,

Ciudad Universitaria (1428) - Buenos Aires - Argentina

e-mail: ledesma@df.uba.ar

(Dated: Octubre de 2006)

Las pantallas de cristal líquido del tipo comercial (obtenidos de un videoprojector) han demostrado poseer numerosas aplicaciones en el procesado óptico de imágenes. Los usos son muy variados y van desde la representación de hologramas digitales hasta la implementación de óptica difractiva para conformar haces. En este trabajo se estudió la capacidad de modulación de una pantalla de cristal líquido nemático para el caso de longitud de onda del rojo e infrarrojo cercano. Cabe destacar que esta situación es desfavorable para lograr una máxima modulación de fase ya que a longitudes de onda mayores, la modulación resulta menor. Se usaron modelos que predicen de manera cualitativa la modulación, tanto de amplitud como de fase de estos dispositivos. Estos modelos se basan en la utilización de luz elípticamente polarizada tanto a la entrada como a la salida del panel. Una vez variados los parámetros del problema se buscó la configuración que maximice la modulación en fase y mantenga la amplitud prácticamente constante utilizando láminas retardadoras para las longitudes de onda involucradas. Se presentan los resultados de esta configuración y aplicaciones que permiten mover el spot del láser.

Palabras Clave: Óptica difractiva, pantallas de cristal líquido, microscopía.

Commercial liquid crystal displays have many applications in optical image processing. The many uses include digital hologram representation and diffractive optics implementation. In this work it was studied the capability of modulation of a nematic liquid crystal display for both wavelenghts, red and infrared. It is worth mentioning the disadvantages working in the infrared, longer wavelengths leads to less modulation. Models that predict qualitatively phase and amplitude modulation were used. These models consider polarized elliptical light at both sides of the display. Once the problem's parameters were varied, the configuration that carries to maximum phase modulation and constant amplitude was searched. Some applications that allow to move the laser spot are presented.

Keywords: Diffractive optics, liquid crystal displays, microscopy.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han explorado una gran diversidad de aplicaciones utilizando pantallas de cristal líquido nemático, LCDs (de *liquid crystal displays*) como moduladores espaciales de luz. En este sentido, se han utilizado este tipo de pantallas comerciales como medio para representar una transmitancia, en general compleja, que modifica el frente de ondas del campo incidente con diversos fines. Así, por ejemplo, se han producido aplicaciones que van desde la compresión de pulsos para comunicaciones ópticas a control de fenómenos cuánticos.

Vale mencionar que en los últimos dos años han aparecido solo en *Optics Express* una centena de artículos en el área. Sin el ánimo de realizar un exhaustivo análisis de la bibliografía existente, citaremos solamente algunos ejemplos representativos. Por ejemplo, D. McGloin et al.¹ muestran como estos moduladores pueden ser reconfigurados dinámicamente para ser aplicados en el campo de la de la óptica atómica. Los autores demuestran como número de figuras (como figuras de interferometría Mach-Zehnder y la generación de haces tipo "bottle-beam") que son difíciles de generar mediante técnicas de microóptica pueden ser fácilmente logradas con estos dispositivos. Por otra parte, Xiaodong Xun et al.² han propuesto utilizar moduladores espaciales de luz basados en pantallas de cristal líquido para generar óptica difractiva que puede ser

utilizada en trampas láser (laser trapping).

En otra área, procesado óptico de la información, estos elementos han sido ampliamente utilizados tanto en sistemas coherentes³⁻⁶ como medios donde representar filtros holográficos así como en sistemas incoherentes introduciendo las correcciones cromáticas correspondientes^{7,8}.

Una aplicación de particular interés en biología, medicina y ciencias de los materiales es la relativa a microscopía. Por ejemplo, se ha mostrado un mecanismo de seguimiento para microscopía basado en paneles de cristal líquido⁹ y más recientemente se ha demostrado la posibilidad de distinguir objetos biológicos de bajo contraste utilizando una fase espiral representada en un modulador espacial de luz¹⁰⁻¹¹. Dentro esta línea, cabe mencionar que los más recientes avances en la comprensión de fenómenos biológicos dinámicos recurren a la microscopía de fluorescencia. En este sentido resulta de interés poder analizar la viabilidad de operar estos dispositivos a longitudes de onda largas, particularmente en infrarrojo cercano (alrededor de 780nm), para las cuales algunas sustancias típicamente empleadas en microscopía fluorescen. Cabe destacar, que con estas longitudes de onda se obtiene una configuración desfavorable para la modulación de fase, ya que esta disminuye al aumentar la longitud de onda. Así, moduladores que ya han sido caracterizados y que han probado ser funcionales para las frecuencias presentes en un láser de Argón, podrían tener serias limitaciones en el rojo e infra-

rojo cercano. En este trabajo presentamos un estudio sobre la modulación de una pantalla de cristal líquido comercial para longitudes de onda de 633nm y de 780nm correspondientes a un láser de He-Ne y de un láser de estado sólido infrarrojo respectivamente. Una vez comprobada la capacidad de modular un rango de fases que va aproximadamente de 0 a π , se discuten las posibles aplicaciones en cuanto a movimiento del haz se refiere.

En el siguiente apartado se analiza, desde el punto de vista de la óptica de Fourier, como influyen los desfases en el plano de frecuencias espaciales en el movimiento del haz. A continuación se muestra el experimento realizado y los resultados obtenidos. Por último, se discuten las conclusiones en la parte final de este trabajo.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Analizaremos brevemente en este apartado como es posible modificar la posición del spot de iluminación en un sistema de microscopía, mediante la introducción de una fase lineal en el plano de Fourier. La disposición experimental se muestra en la Figura 1. La idea es introducir en el camino del haz, un expansor, un colimador, un modulador espacial de luz (manejado a través de una PC) y una lente para focalizar el spot. En la figura se esquematizan las coordenadas radiales sobre el modulador (r) y sobre el plano de enfoque (R). Consideraremos que la iluminación es uniforme sobre todo el modulador. Llamaremos x a la coordenada centrada sobre el modulador, f_x a la frecuencia espacial asociada y L al ancho del modulador. Supondremos que esta coordenada barre desde un valor $-0,5L$ en el extremo izquierdo del modulador a $0,5L$ en el extremo derecho. Supondremos además que sobre el modulador se aplica una fase lineal en todo su ancho que adopta los valores ϕ_1 en $-0,5L$ y ϕ_2 en $0,5L$. Luego, la fase puede expresarse como la siguiente relación lineal:

$$\phi(x) = (\phi_2 - \phi_1)x/L + \frac{\phi_2 + \phi_1}{2} \quad (1)$$

La amplitud de campo eléctrico en el foco de una lente, o el campo en la aproximación de Fraunhofer, será proporcional a la transformada de Fourier de esta función desplazada a una frecuencia $f_{x_0} = (\phi_2 - \phi_1)/2\pi L$. Dado que sobre el modulador incide un haz con simetría cilíndrica, la transformada de Fourier tendrá también esa simetría alrededor de un nuevo origen desplazado horizontalmente. Es decir, el campo eléctrico en una coordenada medida respecto de este origen, se expresa como:

$$U(R) \propto \int_0^{0,5L} r J_0(2\pi r \rho) dr \propto \frac{J_1\left(\frac{\pi LR}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi LR}{\lambda f}} \quad (2)$$

siendo $\rho = \sqrt{(f_x - f_{x_0})^2 + f_y^2} = \frac{R}{f}$ la frecuencia espacial en coordenadas polares, λ la longitud de onda empleada y f la distancia focal de la lente donde se observa el spot final.

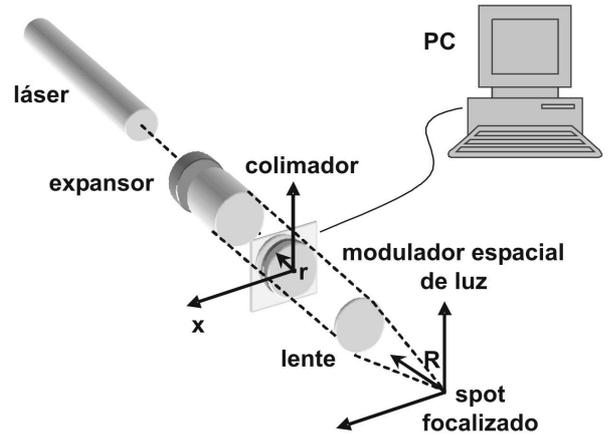


Figura 1: Dispositivo experimental utilizado para modificar la posición del spot de iluminación en un sistema de microscopía.

Para una diferencia de fase nula, el primer cero de la función expresada en (2) se obtiene en $\rho = 1,22/L$. Variando la diferencia de fase a lo largo del modulador se puede desplazar el spot a distancias próximas al centro o a distancias más allá del primer mínimo. Así por ejemplo si la diferencia de fase es π , entonces el movimiento del spot correspondería a $0,5/L$. Si en cambio se llega a 2π , se obtendrá un movimiento de $1/L$ es decir, aproximadamente del orden del semiancho total. Claramente si se requieren desplazamientos mayores habrá que utilizar rectas de mayor pendiente. Sin embargo, es posible obtener estas respuestas con un modulador que pueda modular fases completas de 0 a 2π , representando la fase módulo 2π . En ese caso, la fase lineal queda representada como una red con blaze formada por triángulos rectángulos. En esta red de difracción ideal se obtendría un único orden de difracción, que no es más que el spot desplazado. En el caso de no obtenerse una modulación completa de 0 a 2π , es posible generar redes con blaze donde uno de los órdenes queda claramente intensificado, pero no se anulan los restantes. Si se acepta como significativa toda intensidad que supere un cierto umbral, esta es una aproximación posible para simular un movimiento del spot, tal como se verá en la sección de aplicaciones.

III. RESULTADOS

A. Calibración del modulador

A partir del control de la polarización de la luz de entrada en la pantalla y mediante un modelo teórico de la birrefringencia en función de la tensión (nivel de gris) aplicada sobre el cristal, se puede obtener una modulación desacoplada. Es decir, se puede modular mayormente la fase o mayormente la amplitud¹²⁻¹⁶. La configuración experimental utilizada es la que se muestra en la figura 2. Lo que nos permite esta configuración es tener una polarización elíptica arbitraria a la entrada y a la salida de la pantalla. Este dispositivo que llamaremos SLM (del inglés *spatial light modulator*) consiste en dos polarizadores a los extremos y dos láminas retardadoras a la en-

trada y a la salida de la pantalla LCD. Los parámetros variables del modelo son los ángulos de los dos polarizadores y las dos láminas retardadoras con su respectivo desfase según la longitud de onda utilizada.

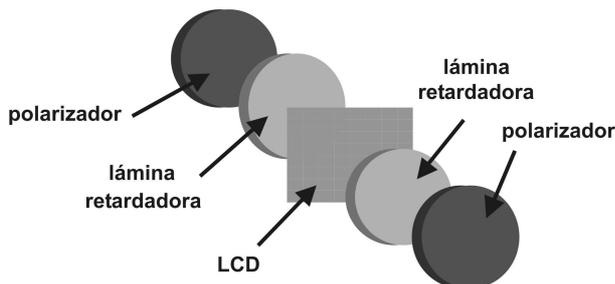


Figura 2: Dispositivo experimental utilizado para obtener un modulador espacial de luz (SLM) a partir de dos polarizadores, dos láminas retardadoras y una pantalla LCD de cristal líquido nemático.

Para realizar la calibración, se representa en la LCD una red rectangular. La variación de la fase al atravesar la pantalla se obtiene de la siguiente expresión:

$$\cos(\phi) = \frac{(2/\pi^2) I_0 - I_1}{(2/\pi^2) I_0 + I_1} \quad (3)$$

donde ϕ es el desfase introducido por la pantalla, e I_0 e I_1 son las intensidades correspondientes al orden 0 y 1 de difracción, respectivamente. Cabe aclarar que esta fórmula es válida siempre que la amplitud de la luz que atraviesa el SLM se mantenga constante.

La pantalla de cristal líquido nemático que utilizamos, de marca CRL (Central Research Laboratories), posee una resolución de 640x480 pixeles. A través de una PC se representan en la LCD imágenes en nivel de gris de 8-bits (valores de 0 a 255), que se corresponden con un voltaje determinado.

Para llevar a cabo las mediciones de calibración se hizo incidir un láser sobre el SLM y se midieron las intensidades de los órdenes difractados con un fotosensor (Universal Optical Power Meter, Melles Griot). Las láminas retardadoras utilizadas fueron elegidas entre las que se encontraban disponibles en el laboratorio. Se midieron sus correspondientes desfases para las longitudes de onda utilizadas y se eligieron las que proporcionaban un mayor desfase. En la tabla I se muestra el desfase de las láminas elegidas en las longitudes de onda utilizadas.

Cuadro I: Valores de desfase correspondientes a las láminas retardadoras utilizadas para longitudes de onda en el rojo y el infrarrojo.

Lámina	Desfase en $\lambda=633$ nm	Desfase en $\lambda=780$ nm
1	70.9°	58.8°
2	92.0°	76.0°

A partir de un modelo teórico¹³, se buscó la configuración de ángulos correspondientes a las láminas y polarizadores que nos proporcionasen la modulación deseada mediante la herramienta de optimización *Solver* de Microsoft Excel. Se buscó

que la amplitud permaneciese con variaciones bajas y que la fase llegase a modular en un valor de al menos π .

El láser rojo fue utilizado porque los parámetros del modelo ya habían sido obtenidos anteriormente para esta longitud de onda y se podía utilizar el método de optimización y verificar el buen funcionamiento de la pantalla. En cambio para el infrarrojo se realizó una interpolación.

Para la medición de amplitud se representaron en la pantalla imágenes a nivel de gris constante, variando los mismos entre 0 y 255 en intervalos de a 10. Se midió con un fotosensor la potencia del spot del haz.

El criterio utilizado para aceptar una modulación de amplitud fue que la desviación standard de la misma no superase un valor de 0.01. Además vemos que la variación de amplitud que obtuvimos no supera el 20 % en el rojo y el 3 % en el infrarrojo, presentándose las variaciones máximas sólo en los niveles de gris mayores a 220.

Las mediciones de desfase se realizaron también variando los niveles de gris entre 0 y 255. Se midieron las intensidades de los órdenes cero y uno al representar una red horizontal equiespaciada en 4 pixeles. A partir de los resultados obtenidos, fue posible obtener la curva de desfase según (3).

Los resultados de las modulaciones para las configuraciones encontradas son los que se ven en las figuras 3 y 4.

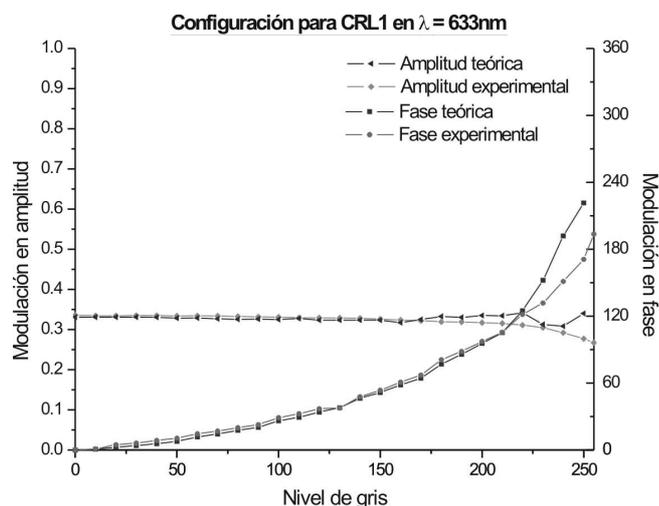


Figura 3: Modulación en fase y amplitud de la pantalla de cristal líquido CRL en la mejor configuración teórica encontrada para la modulación en fase hasta 180° en el rojo.

Para la longitud de onda del rojo se llega a obtener la modulación deseada de π , con una intensidad bastante aceptable.

En el caso de la luz en el infrarrojo nótese de la 4 que la amplitud transmitida es menor que en el caso del rojo. Sin embargo, la potencia del láser del que se disponía permitió que se registren intensidades más altas que en el caso anterior.

En ambos casos se ve que el ajuste experimental con la predicción teórica es muy bueno hasta un valor en niveles de gris de 220. Esto puede deberse a ciertos anamorfismos encontrados en las pantallas¹⁴. Sin embargo, esto no perjudicó nuestros objetivos, ya que se logró llegar a la modulación de π deseada, manteniendo la amplitud lo más constante posible.

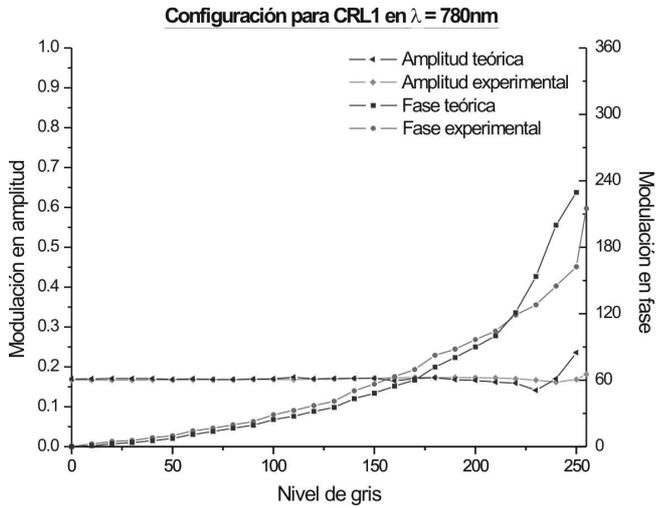


Figura 4: Modulación en fase y amplitud de la pantalla de cristal líquido CRL en la mejor configuración teórica encontrada para la modulación en fase hasta 180° en el infrarrojo.

Una vez encontrada la modulación deseada se realizó un ajuste inverso de la curva de modulación en fase para cada caso. Este fue realizado con el Origin 7.5 a partir de un ajuste polinomial de grado 7. Los coeficientes obtenidos se llevan al programa de generación de imágenes Fresnel, que fue diseñado especialmente para generar y proporcionar imágenes en escala de grises a la pantalla LCD. De esta manera, las imágenes que se envían a la pantalla se realizan en un rango de 0 a 2π , haciendo el programa la conversión correspondiente a nivel de gris. Estos pasos se siguieron tanto para el rojo ($\lambda = 633nm$) como para el infrarrojo ($\lambda = 780nm$).

Otras mediciones fueron efectuadas con el láser de $\lambda = 633$ nm con el fin de verificar que la modulación obtenida es efectivamente la deseada y que el polinomio generado responde a nuestras necesidades. Para ello se generaron dos redes a) y b) que se pueden observar en la figura 5. La primera de ellas corresponde a una almena de fase π , que se sabe proporciona un patrón de difracción donde el orden 0 se anula y los órdenes 1 y -1 se intensifican. Se buscó también otra modulación en donde los tres órdenes obtengan la misma intensidad. Teóricamente este valor corresponde a aproximadamente 0.7π , pero finalmente fue medido con un valor de 0.8π . Otra opción que se propuso para verificar nuestras mediciones fue una red con blaze de fase π . Estos tres resultados se pueden observar en la figura 6. Tal como se aprecia de esta figura, la respuesta se ajusta muy bien las predicciones teóricas ya que el orden -1 se anula y los órdenes 0 y 1 producen casi la misma intensidad de luz.

Los resultados obtenidos son muy buenos para todos los casos. Suponemos que el desajuste de los datos teóricos con los experimentales para la almena 0.8π pueden ser debidos a la poca precisión del polinomio interpolador en los valores en que la pendiente de la curva medida se torna más abrupta. Un mejor ajuste y unos mejores resultados serían esperables si se realizara un estudio más detallado de la curva de modulación de fase, sobre todo para la zona en que el nivel de gris supera

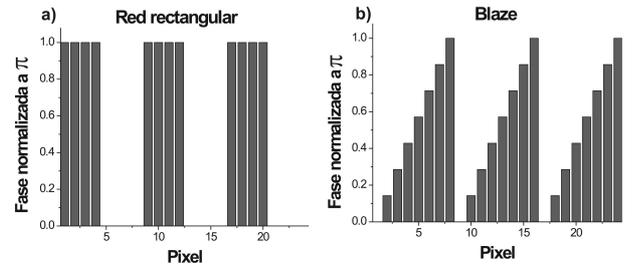


Figura 5: Redes de período 8 pixeles y fase π a) almena y b) red de blaze, utilizadas para corroborar la modulación en fase encontrada.

el valor de 220.

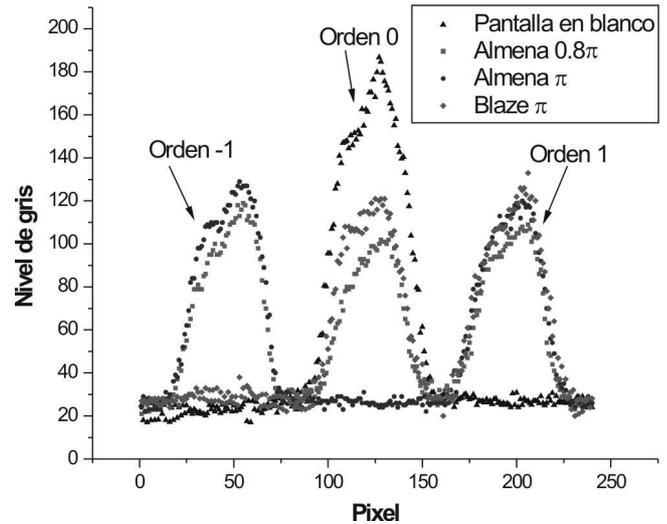


Figura 6: Intensidades en nivel de gris para almenas y red blaze (ver figura 5) generadas en la pantalla LCD. Comparación con imagen sin modular.

B. Aplicaciones para el movimiento del spot

1. Fase lineal

En esta sección presentamos cómo es posible lograr el movimiento del spot mediante la introducción de una fase lineal. Para ello se generó en la pantalla una fase de 0 a π en el sector central sobre un círculo de 100 pixeles de radio, y en el resto de la misma colocamos una red de fase π de tipo almena como se representa en la figura 7. Como se mencionó anteriormente, esta red anula por completo el orden 0 del patrón de difracción. De esta manera sólo se ve en el orden 0 la luz que atraviesa la fase lineal.

Las imágenes del spot del láser fueron registradas para una fase creciente y una decreciente. Para capturar la imagen del spot se utilizó un objetivo de microscopio de 25X y una cámara CCD (charged coupled device) desprovista de su lente. El movimiento del spot fue el esperado y corresponde al valor de medio radio hacia arriba y medio hacia abajo, generando

así un desplazamiento relativo entre ambos de un radio del spot como se ve en la figura 8.

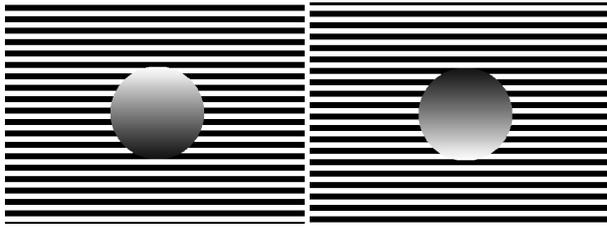


Figura 7: Imágenes representadas en el modulador para generar el movimiento del spot del láser. El centro corresponde a un desfase lineal que va de 0 a π de 100 píxeles de radio. En el fondo se representa una red rectangular de fase 0- π . La escala del círculo y del fondo no son las mismas, para mejor visualización.

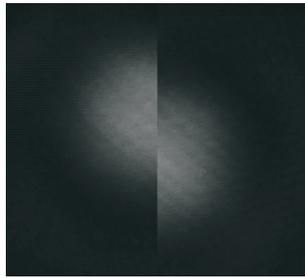


Figura 8: Movimiento del spot del láser a partir de la generación de una fase lineal como la que se muestra en la figura 7.

En un futuro se prevé incorporar una fase lineal en forma de anillo que reduciría el tamaño del spot y permitiría lograr un movimiento del orden del tamaño del spot.

2. Redes con blaze

Otras aplicaciones fueron probadas con el láser infrarrojo. En este caso se trata de emular una fase lineal más allá de los 180° utilizando una red con blaze. En la figura 9 se muestran dos de las redes utilizadas. El primer intento que se realizó fue mantener el desfase de π en la zona en que la pantalla no es capaz de modular (entre 180° y 360°). El patrón de intensidades que se obtuvo es bastante bueno. Se anula el orden 0 de difracción, pero todavía mantiene un nivel de intensidad considerable en el orden -1, como se puede ver en la figura 10. También se observa en la misma figura un resultado mejorado para este intento, donde se presenta una red de blaze con la menor distancia euclídea hasta una red de modulación de 2π . Llamando a esta red de "doble meseta", se ve que trata de acercarse a una modulación de 360° utilizando un desfase correspondiente a 0° .

Los resultados obtenidos en intensidades son muy buenos. Se ve que la intensidad relativa de los órdenes 1 y -1 es considerable, haciendo posible que, ante aplicaciones que sean sensibles a partir de un umbral de intensidad determinado, esta configuración sirva para mover el spot hacia el primer orden

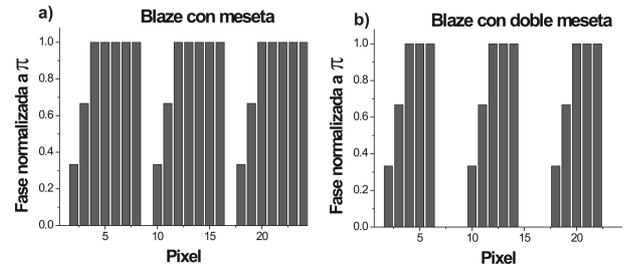


Figura 9: Redes de período 8 píxeles y fase π a) blaze con meseta y b) blaze con doble meseta, utilizadas para mover el spot del láser.

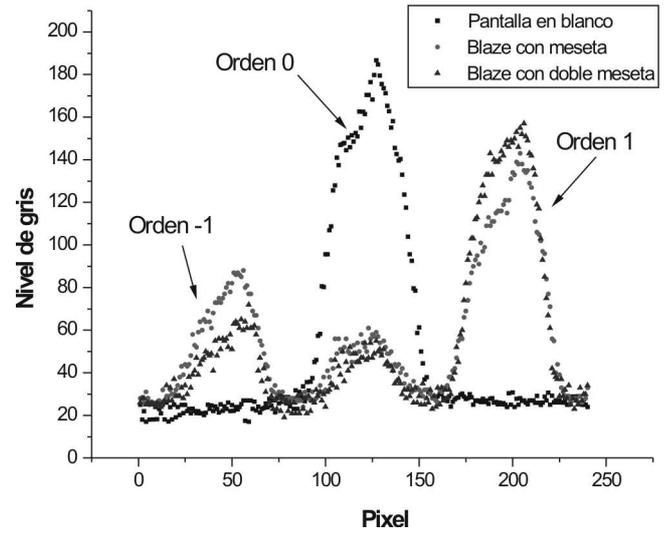


Figura 10: Intensidades en nivel de gris para redes de fase con blaze generadas en la pantalla LCD (ver figura 9) con una modulación 0- π . Comparación con imagen sin modular.

de difracción en aplicaciones prácticas.

IV. CONCLUSIONES

Vimos que las pantallas de cristal líquido son capaces de modular la fase de la luz en el rojo y el infrarrojo hasta un valor de π . Se mencionó sobre la calibración de la pantalla que un mejor ajuste y unos mejores resultados serían esperables si se realizara un estudio más detallado de la curva de modulación de fase, sobre todo para la zona en que el nivel de gris supera el valor de 220.

Presentamos dos aplicaciones que apuntan a estudiar la posibilidad de mover el spot a velocidad de video. Por un lado se representó una fase lineal que varía de 0 a π , obteniéndose un movimiento del orden de la mitad del ancho del spot. Este resultado es alentador y sugiere que un adecuado diseño de pupila que reduzca a la mitad el tamaño del spot permitiría mover el spot por completo. Esto tiene particular interés en microscopía de fluorescencia. Por otra parte, se representaron diferentes redes con blaze que intentan emular una red 0- 2π . Los resultados obtenidos en intensidades son muy buenos. Se

ve que la intensidad relativa de los órdenes 1 y -1 es grande. Aplicaciones que sean sensibles a partir de un umbral de intensidad, pueden en la práctica considerarse como si el movimiento del spot fuese hasta el primer orden de difracción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente realizado con subsidios de UBA (EX215) y ANPCYT (PICT12333).

-
- ¹ D. McGloin, G.C. Spalding, H. Melville, W. Sibbett, *Opt. Express*, 11, No. 2, 158 (2003).
 - ² Xiaodong Xun, Xiaoguang Chang and Robert W. Cohn, *Opt. Express*, 12, No. 2, 261 (2004).
 - ³ S.Ledesma, C.Iemmi, J.Campos, M.Yzuel, *Opt. Comm.* 151, 101 (1998).
 - ⁴ J. Mazzaferri, S. Ledesma, C. Iemmi, *J. of Opt. A, Pure Appl. Opt.* 5, 425-431 (2003).
 - ⁵ J. Mazzaferri, S. Ledesma, *J. of Opt. A, Pure Appl. Opt.*, 7, 1-7 (2005).
 - ⁶ G. Puentes, C. La Mela, S. Ledesma, C. Iemmi, J. P. Paz, M. Saraceno, *Phys. Rev. A* 69, 042319 (2004).
 - ⁷ María S. Millán, Joaquín Otón and Elisabet Pérez-Cabré, *Opt. Express*, 14, 20, 9103 (2006)
 - ⁸ A. Márquez, C. Iemmi, J. Campos, and M. J. Yzuel, *Opt. Lett.* 31, 392-394 (2006).
 - ⁹ M. G. Capeluto, C. La Mela, C. Iemmi, M. C. Marconi, *Opt. Comm* 232, 107 (2004).
 - ¹⁰ Alexander Jesacher, Severin Fuhrhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte, *Phys Rev. Lett.* 94, 233902 (2005).
 - ¹¹ Severin Fuhrhapter, Alexander Jesacher, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte, *Opt. Express* 13, 3, 689 (2005).
 - ¹² C. Soutar, K. Lu. *Opt.Eng.*, 33, 2704, (1994).
 - ¹³ A. Marquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. Davis, J. Campos, M. Yzuel. *Opt. Eng.* 40, 2558, (2001)
 - ¹⁴ A.Marquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. Yzuel. *Opt. Exp.* 13, 2111, (2005)
 - ¹⁵ J. A. Davis, J. C. Escalera, J. Campos, A. Márquez, M. J. Yzuel, C. Iemmi, *Opt. Letters* 24 (1999) 628.
 - ¹⁶ A. Márquez, C. Iemmi, J. C. Escalera, J. Campos, S. Ledesma, J. A. Davis, M.J. Yzuel, *Appl. Opt.* 40 (2001) 2316.