Memoria Holográfica Volumétrica Reconfigurable

por:

Helen Janeth Zúñiga Osorio
Ing., Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE ÓPTICA

en el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Noviembre 2006
Tonantzintla, Puebla, México

Supervisada por:

Dr. Eduardo Tepichín Rodríguez
Dra. María Albertina Castro Ibarra
Investigadores Titulares del INAOE

©INAOE 2006
Derechos Reservados
El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes

ÍNDICE I

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN VI

DEDICATORIAS VII

AGRADECIMIENTOS VIII

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN **1**

Referencias 4

CAPÍTULO 2

TEORÍA BÁSICA

2.1 **Introducción** **6**

2.2 **Holografía** 6

2.2.1 Clasificación de hologramas 9

2.3 **Multiplexado de Hologramas** 11

Referencias 15

CAPÍTULO 3

ALMACENAMIENTO HOLOGRÁFICO DE INFORMACIÓN

3.1 **Sistema óptico para el almacenamiento holográfico de información** **16**

3.2 **Componentes del sistema óptico** 18

3.2.1 Cristales fotorrefractivos 23

Referencias 29

CAPÍTULO 4

MEMORIA HOLOGRÁFICA VOLUMÉTRICA RECONFIGURABLE: ARQUITECTURA BÁSICA

4.1 Introducción **31**

4.2 Sistema óptico 32

4.2.1 Caracterización del cristal fotorrefractivo $LinbO_3$:Fe 35

4.3 Sistema mecánico 44

4.4 Sistema electrónico 46

4.5 Software de control 48

4.5.1 Programa de control del sistema mecánico de posición 49

4.5.2 Lectura y grabado de hologramas 50

Referencias 53

CAPÍTULO 5

MEMORIA HOLOGRÁFICA VOLUMÉTRICA RECONFIGURABLE: INTEGRACIÓN DEL SISTEMA OPTO-ELECTRÓNICO

5.1 Introducción **55**

5.2 Integración 55

5.3 Resultados 60

Referencias 62

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones **64**

6.2 Trabajo a futuro 65

Lista de trabajos publicados 66

APÉNDICE A- ELEMENTOS DE CONTROL **69**

Referencias 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Interferómetro para obtener un holograma 7

Figura 2.2 Reconstrucción de un objeto 9

Figura 2.3 Arreglo para obtener un holograma de Fraunhofer 10

Figura 2.4 Luz difractada por una red holográfica de volumen 11

Figura 3.1 Diagrama esquemático para almacenar información en forma de holograma de Fourier 16

Figura 3.2 Estructura básica de un LCD 19

Figura 3.3 Orientación de las moléculas del cristal líquido en un LCD 20

Figura 3.4 Proceso de transmisión de luz a través de un LCD 21

Figura 3.5 Reacciones físicas durante el fenómeno fotorrefractivo 25

Figura 3.6 Sistema óptico de la propuesta 28

Figura 4.1 Diagrama de bloques de la memoria holográfica volumétrica 32

Figura 4.2 Sistema óptico de la memoria holográfica volumétrica 33

Figura 4.3 Resolución espacial de los píxeles de la pantalla LCD 34

Figura 4.4 Cámara CCD ubicada en el plano de lectura del sistema 35

Figura 4.5 Características del cristal fotorrefractivo empleado 36

Figura 4.6 Esquema del sistema óptico dinámico implementado para almacenar hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de LiNbO3:Fe 38

Figura 4.7 Esquemas del sistema óptico dinámico 39

Figura 4.8 Comportamiento temporal de la potencia de los hologramas y la eficiencia de refracción 41

Figura 4.9 Comportamiento temporal de la modulación del índice de refracción del LiNbO3:Fe 42

Figura 4.10 Comportamiento temporal de la potencia de lectura de los hologramas obtenidos con el Experimento 1 43

Figura 4.11 Comportamiento temporal de la potencia de lectura de los hologramas obtenidos con el Experimento 2 44

Figura 4.13 Sistema mecánico de posición de 3D 46

Figura 4.14 Sistema electrónico 47

Figura 4.15 Diagrama de programación de la interfase gráfica 49

Fig. 4.16 Panel del programa del sistema mecánico de desplazamiento 50
Figura 4.17 Programa para el despliegue de información a grabar 52
Figura 4.18 Programa de la adquisición de información 53
Figura 5.1 Memoria Holográfica Volumétrica 56
Figura 5.2 Secuencia de funcionamiento de la Memoria Holográfica volumétrica Reconfigurable 56
Figura 5.3 Hologramas almacenados en la memoria 58
Figura 5.4 Secuencia de funcionamiento de la memoria holográfica como memoria EEPROM 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Dimensiones características de la pantalla LCD 34

Tabla 4.2 Hologramas registrados 40

Tabla 4.3 Lectura de los hologramas del experimento 1 43

Tabla 4.4 Hologramas del experimento 2 leídos 44

Tabla 5.1 Hologramas grabados en la memoria holográfica volumétrica reconfigurable 57

Tabla 5.2 Hologramas de Fourier grabados en el cristal fotorrefractivo 59

Tabla 5.3 Hologramas grabados en el cristal fotorrefractivo 61

Tabla 5.4 Características físicas de los elementos del sistema 61

RESUMEN

En la presente tesis se describe el desarrollo e integración de un sistema optoelectrónico denominado *Memoria Holográfica Volumétrica Reconfigurable,* la cual almacena y guarda información en forma de hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo. Dicha memoria holográfica aprovecha las propiedades de los planos conjugados de los sistemas formadores de imagen de manera que su sistema óptico consta únicamente de una lente, a diferencia de los sistemas 4f que son los más utilizados en sistemas que tienen este propósito.

Para tener un sistema dinámico en donde el usuario no intervenga de manera directa con él, se utilizó una LCD como modulador espacial de luz, para el grabado de los hologramas; una cámara CCD para la lectura de los mismos hologramas y un sistema mecánico de posición en 3D para poder realizar el multiplexado de información y lograr así grabar un mayor número de estos hologramas.

El movimiento del sistema mecánico se realiza controlando tres motores de pasos, a través de un circuito electrónico que se comunica de forma serial con una computadora. De esta manera que el usuario puede modificar la información y la posición en la cual ésta será almacenada o leída a través de una interfase gráfica desarrollada en LabVIEW.

DEDICATORIAS

A mis padres, **Miguel Ángel Zúñiga Gómez** y **María del Pilar Osorio Calvo**, por su amor incondicional y apoyo ejemplar. Sin duda, su guía me hace fuerte en cada día de mi vida, y me soporta hasta en los momentos más oscuros de mí andar.

A **Miguel Ángel** y **Claudia Nayeli,** quienes siempre me hacen sentir afortunada y dichosa por la bendición de que sean mis hermanos que con su ejemplo predican el amor por la vida. La inquietud por vivir de Uds. solo se puede comparar con el amor de cristo por nosotros los hombres.

A **mis abuelos**, que en los breves momentos de coincidencia me proporcionan sabiduría en sus cortas, pero acertadas palabras.

A la molestia más grande de mí camino!! Quien con su convivencia ha infectado mi vida de anhelos y esperanzas. Este trabajo es para ti **Mundo**!

A Dios padre, hijo y espíritu santo. Porque sin ellos, mi vida sería simplemente una rosa en medio de altamar.

"Posará en ti sus ojos y te hará parte de su mundo sin que para ello debas mostrarte en forma distinta "

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis. El Dr. Eduardo Tepichín Rodríguez, y la Dra. Ma. Albertina Castro Ibarra. Por brindarme más que su apoyo docente. Me han brindado su amistad, y consejo hasta en los últimos momentos.

A todos los integrantes del Grupo de Ciencia de la Imagen de óptica, como lo son Gustavo Zavaleta, Jorge Ibarra, Alejandro Landa, Dra. Estela, Dr. José Guadalupe, Dr. David Sánchez, Dr. Ángel Sauceda, Dr. Scherbakov, por mencionar algunos.

A mis amigos casi hermanos, me refiero a mis compadres cubanos: José Alberto Delgado Atención y Margarita Cunill. Con su ayuda, mi estancia en INAOE fue mucho más placentera y agradable.

A todos los integrantes de las coordinaciones de óptica y docente, especialmente a Paty, Liliana, Natalia, Rocio Rodas, Cecy, Martita, Dr. Murphy, Dr. Sergio, entre otros.

A la familia Rodríguez Vázquez, por brindarme su amistad, compañía y la oportunidad de formar parte de su familia.

A la familia García Porquillo, Don Miguel García (Q.D.E.P), Doña Toñita y Doña Paty. Por soportarme poco más de año y medio.

Al CONACyT por otorgarme la beca para realizar mis estudios de Maestría en el INAOE, y por el apoyo otorgado a través del proyecto PY-42822.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Actualmente una de las tendencias para el almacenamiento óptico de información es la de aprovechar el fenómeno de interferencia luminosa para registrar hologramas de imágenes en medios especiales como cristales fotorrefractivos y películas holográficas [1.4]. Este procedimiento implica poder almacenar imágenes tridimensionales y aun más importante una gran capacidad de almacenamiento de información; características que impulsaron su reconocimiento tecnológico casi inmediato [1.1].

El objetivo principal de este trabajo de tesis es el desarrollar memorias ópticas equivalentes a las memorias de sólo lectura (tipo ROM), o bien memorias de acceso aleatorio (tipo RAM) basadas en sistemas holográficos. El desarrollo teórico de este tipo de almacenamiento se dio desde hace unos 40 años [1.2, 1.3]; sin embargo, el desarrollo tecnológico ha sido limitado por la falta de disponibilidad de los componentes adecuados, la complejidad de los algoritmos que implicaba este tipo de almacenamiento, y quizás el más importante, la ausencia de materiales de registro holográfico que puedan satisfacer las rigurosas necesidades de la holografía.

Recientemente, el desarrollo de componentes prácticos para los sistemas holográficos ha vuelto a encender el interés por esta tecnología. A diferencia de los CDs y DVDs que almacenan los datos bit a bit en sus superficies, los dispositivos holográficos almacenan mapas de bits en tres dimensiones, lo que permite un mayor incremento en la capacidad de almacenamiento y velocidad de acceso. Por ello, la tendencia a almacenar

millones de bits a la vez, como sucedería en un disco holográfico ha llevado a las empresas a desarrollar soportes holográficos que alcanzarán una capacidad de almacenamiento 50 veces superior a la de un DVD y 460 veces mayor que la de un CD [1.4, 1.5]. Los laboratorios de investigación están perfeccionando sus polímeros especiales para adecuarlos a la producción de soportes de datos con capacidades de hasta 1.6 TB (1,600 GB). Este gigantesco volumen de datos equivale a los fondos de una gran biblioteca con unos cuatro millones de libros. Los más importantes fabricantes de dispositivos de almacenamiento ven a la holografía como el siguiente paso en la evolución del almacenamiento de información [1.4, 1.6].

Aun así existe la problemática de que la capacidad de almacenamiento debe de satisfacer el gran aumento de desarrollo y distribución de información. Diferentes fuentes dedicadas al estudio estadístico, concuerdan en que las necesidades en capacidad de almacenamiento de información se cuadruplican cada seis meses [1.7]; razón por la cual, nos dimos a la tarea de desarrollar en esta tesis un prototipo para almacenamiento de información, basado en tecnologías holográficas [1.8- 1.10]. Esta información representada en forma de imágenes bidimensionales, deberá ser localizada en el medio de grabado y reconstruida todas las veces que sea necesario.

Ya que el interés es regrabar y reconfigurar la memoria holográfica en todo momento, se decidió utilizar una pantalla de cristal líquido como entrada a nuestro sistema holográfico, y almacenar las imágenes mediante hologramas tipo Fourier modificando la arquitectura tradicional del sistema formador de imágenes de doble lente conocido como 4f [1.11, 1.12] por una arquitectura de formación de imágenes con una sola lente.

Adicionalmente el medio de registro de la información es un cristal fotorrefractivo el cual permite el grabado de información de forma dinámica.

Por todo esto y para lograr nuestro objetivo, en el capítulo 2 se hace un breve repaso de los conceptos básicos de la holografía. En el capítulo 3 se describe la metodología para realizar el almacenamiento holográfico de información; la descripción de la arquitectura de la memoria holográfica será descrita en el capítulo 4. Descritas las partes que conforman a la memoria holográfica, en el capítulo 5 se detalla la integración del sistema opto-electrónico. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan los conclusiones.

REFERENCIAS

[1.1] V. Heerden “Theory of Optical Information Storage in Solids”, Applied Optics, Vol. 2, No. 4, april 1963, pp 393-400.

[1.2] H.J. Coufal, D. Psaltis, G.T. Sincerbox “Holographic Data Storage”, Springer, USA, 2000.

[1.3] G. Sincerbox (Ed.), “Selecter Papers on Holographic Storage”.SPIE press, 1994. V. MS95

[1.4] Bayer MaterialScience “Nota de Prensa”, Bayer Communications, april 2005, Leverkusen Germany.

[1.5] D. Levi, F. Monte, T. Belenguer, P. Cheben, A. Nuñez, M. Ulibarrena “Patente de Invención 2141653, España, 2001.

[1.6] J. Ashley, C. Jefferson, M. Bernal, B. Marcus, G. Burr, R. Macfarlane, H. Coufal, R. Shelby, H. Guenther, G. Sincerbox, J. Hoffnagle “Holographic Data Storage”, IBM Journal Res. Develop. Vol 44, 2000.

[1.7] P. Cheben & M. A. Calvo “Óptica Avanzada”, Ariel Ciencia, Barcelona España, septiembre 2002.

[1.8] E. Rodríguez, H. Zúñiga, E. Tepichín “Automatic System for a Holographic Memory”, International Conference on Dynamics, Instrumentation and Control, Querétaro México, Agosto 2006.

[1.9] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín “Memoria Holográfica Reconfigurable”, 3er. Encuentro Mujer en la Investigación Científica, León Guanajuato México, Abril 2006.

[1.10] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín “Memoria Holográfica Automática”, IEEE CD proceedings, Congreso Interuniversitario de Electrónica, Computación y Eléctrica, Ciudad Obregón Sonora México, Febrero 2006.

[1.11] X. An, D. Psaltis, G.W. Burr “Termal fixing of 10000 holograms in $LiNbO_3$:Fe, Applied Optics, Vol. 38, No. 2, 1999.

[1.12] B. Javidi, T. Normura “Securing Information by use of Digital Holographic”, Optics Letters, Vol. 25. 2000.

CAPÍTULO 2

TEORÍA BÁSICA

2.1 Introducción

En este capítulo se describirá la teoría básica para comprender de manera sencilla los términos mencionados a lo largo de la presente tesis. La siguiente sección inicia con la definición del término holograma, posteriormente se hace una clasificación de éstos; así como las diferentes técnicas de multiplexado que permiten superponer varios hologramas dentro de un mismo volumen.

2.2 Holografía

Mucho antes de que se construyera el primer láser, Dennis Gabor buscaba un método para mejorar la resolución y definición del microscopio electrónico. El método ideado por Gabor consistía en dos pasos, el primero consistía en el registro (en una placa fotográfica de alta resolución) del patrón de difracción producido por una onda luminosa cuando pasa por el objeto cuya imagen se desea formar. El segundo paso consistía en pasar un haz luminoso a través del registro fotográfico, una vez revelado. Al pasar la luz por esta placa, se difractaba de manera que en una pantalla colocada delante de ésta se formaba una imagen del objeto. Gabor no tuvo éxito con su propósito fundamental, pero sí había formado el primer holograma [2.1].

Como se mencionó anteriormente, cuando se registra la interferencia de dos ondas en un medio holográfico, se modifican algunas de sus

propiedades ópticas como lo son la conductividad y/o el índice de refracción que resultan ser proporcionales a la intensidad registrada. La intensidad del patrón de interferencia de dos ondas varía sinusoidalmente con la diferencia de fase entre esas dos ondas en cada punto del espacio. Los planos de intensidad constante son un conjunto de planos paralelos, ortogonales al plano definido por los vectores de propagación de las dos ondas de registro y que contienen a la dirección de la bisectriz del ángulo que forman estos dos vectores de onda. Estos planos también definen por tanto los puntos donde las características ópticas del material toman un mismo valor. En el caso de que se produzca la variación o modulación sinusoidal del índice de refracción se habla de redes holográficas de fase, cuando se produzca la modulación de la conductividad, de redes de amplitud; se consideran redes mixtas aquellas en las que ambos parámetros están modulados [2.2].

Para obtener un holograma es necesario hacer interferir dos haces y grabarlos en una placa holográfica.

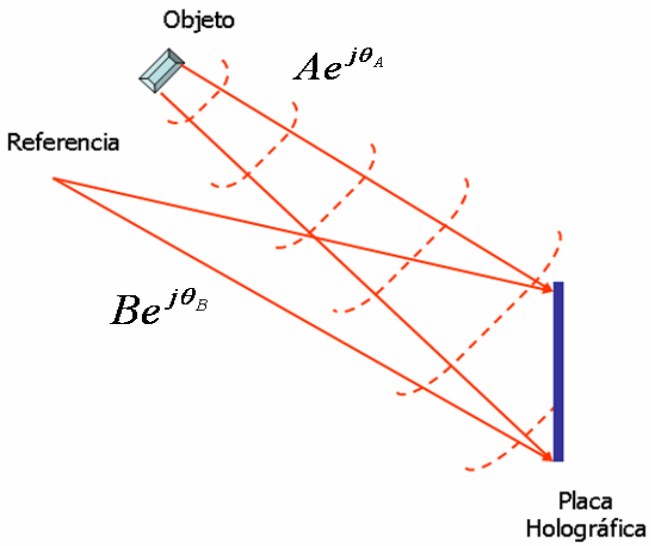


Figura 2.1 Interferómetro para obtener un holograma

Basándose en el sistema interferométrico de la Fig.2.1, los haces provenientes de objeto, *O*, y de la referencia, *R*, se pueden expresar como,

$$O = Ae^{j\theta}A \,, \tag{2.1}$$

y,

$$R = Be^{j\theta_B} \text{, respectivamente.} \tag{2.2}$$

En el punto de intersección donde se encuentra la placa holográfica el campo está definido como,

$$C = Ae^{j\theta_A} + Be^{j\theta_B} \,, \tag{2.3}$$

Y la distribución de intensidad que se registra en dicha película es,

$$\begin{aligned} I &= \left| Ae^{j\theta_A} + Be^{j\theta_B} \right|^2 \\ &= \left(Ae^{j\theta_A} + Be^{j\theta_B} \right)\left(Ae^{j\theta_A} + Be^{j\theta_B} \right)^* \\ &= |A|^2 + |B|^2 + AB^* e^{j\theta_A} e^{-j\theta_B} + A^* B e^{-j\theta_A} e^{j\theta_B} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Para recuperar la información contenida en el holograma se ilumina a éste nuevamente con el haz de referencia, de esta forma obtenemos,

$$I \propto BI = Be^{j\theta_B}\left(|A|^2 + |B|^2 \right) + B\left(AB^* e^{j\theta_A} \right) + Be^{j\theta_B}\left(A^* Be^{-j\theta_A} e^{j\theta_B} \right). \tag{2.5}$$

Donde I es proporcional a la intensidad del campo luminoso obtenido en el plano de lectura.

Podemos observar que a la salida se tienen tres haces de luz, uno de los cuales es el mismo haz de referencia atenuado, el segundo es el haz objeto también atenuado, y por ultimo también se tiene el haz objeto atenuado solo que en dirección diferente como se ilustra en la Fig. 2.2.

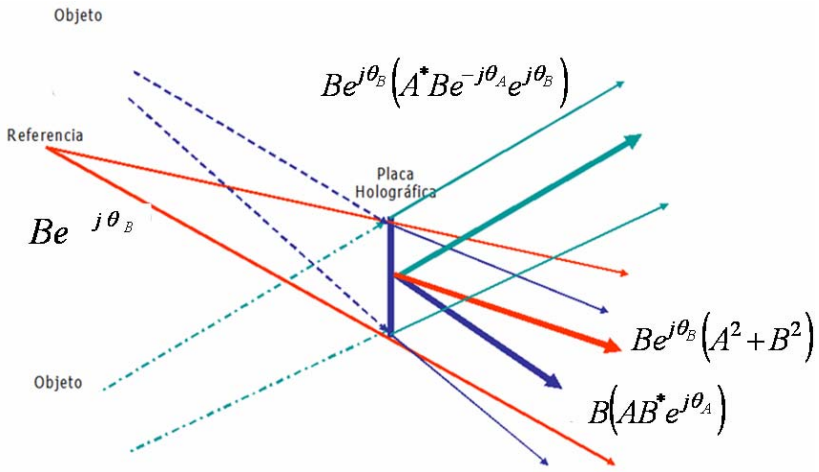


Figura 2.2 Reconstrucción de un objeto

Como se aprecia en Fig. 2.2, la parte del campo resultante que pertenece a la expresión $B\left(AB^*e^{j\theta_A}\right)$, forma una imagen conocida como ortoscópica. En cambio, la parte del campo dada por $Be^{j\theta_B}\left(A^*Be^{-j\theta_A}e^{j\theta_B}\right)$, pertenece a una imagen pseudoscópica.

2.2.1 Clasificación de los hologramas

Con los avances tecnológicos, la holografía ha tenido un progreso impresionante. Sin embargo, las técnicas de fabricación y reconstrucción de hologramas conservan el mismo principio. Los principales tipos de hologramas pueden clasificarse dependiendo de su formación o bien, dependiendo del material de registro.

Una clasificación de hologramas a partir de su formación serían:

- *Hologramas de Fresnel*

Estos hologramas graban la interferencia del patrón de difracción de Fresnel del haz objeto con el haz de referencia. Solo pueden observarse con luz láser.

- *Hologramas de plano imagen*

Para este tipo de holograma, el objeto se ubica en el plano del holograma. Es decir, la imagen real del objeto, formada a su vez por una lente, espejo u otro holograma, es la que se coloca en el plano de la placa fotográfica. Al igual que los hologramas de reflexión, éstos también se pueden observar con una fuente luminosa ordinaria, aunque sí es necesario de una fuente láser para su exposición.

- *Hologramas de color*

Para su fabricación es necesaria fuentes láser de diferentes colores, al igual que para su observación. Por esta característica no son muy comunes.

- *Hologramas de Fraunhofer*

La interferencia grabada en estos hologramas es el patrón de difracción de campo lejano del haz objeto con el haz de referencia. La Fig. 2.3 ilustra un arreglo típico de este tipo de hologramas. También se les conoce como hologramas de transformada de Fourier.

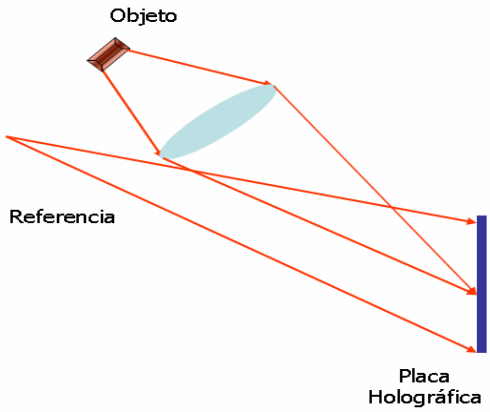


Figura 2.3 Arreglo para obtener un holograma de Fraunhofer.

Por otro lado, dependiendo del material de registro, los hologramas pueden clasificarse como:

- *Holograma delgado*

El periodo de la red en este tipo de hologramas es comparable con su espesor, debido a que no se registra una estructura de planos paralelos dentro del material, sino una estructura superficial.

- *Hologramas de volumen*

En este caso la separación de los planos es menor que el espesor de la película, de forma que la red periódica está formada por un conjunto de planos paralelos como se puede observar en la Fig. 2.4.

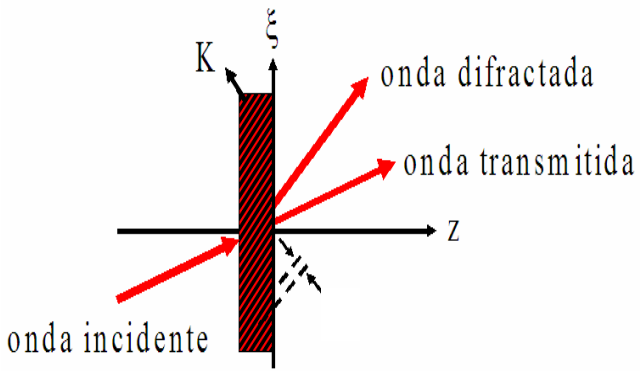


Figura 2.4 Luz difractada por una red holográfica de volumen.

Es importante mencionar que, sólo para un rango limitado de direcciones de incidencia se obtiene luz a la salida, difractada en una dirección distinta a la de la onda incidente. Sólo existe un orden difractado.

2.3 Multiplexado de Hologramas

Algunos de los métodos que permiten superponer varios hologramas dentro del mismo volumen del material son los siguientes:

Multiplexado Angular

Se basa en el control de la resonancia de Bragg mediante los cambios del ángulo de incidencia. En hologramas tipo Bragg (o de volumen), el espaciado entre las franjas de la red holográfica es pequeño en comparación

con el espesor del material. Cuando se ilumina el holograma, el haz de reconstrucción pasa a través de diversas franjas y es parcialmente reflejado por cada una de ellas; la interferencia entre las ondas parcialmente reflejadas produce un fuerte haz difractado en una dirección particular, para la cual las fases de las ondas parciales difieren $2\pi k$ entre sí, es decir, interfieren constructivamente. De forma que la eficiencia de difracción es máxima pero sensible a perturbaciones, tales como cambios en la inclinación de franjas, cambios en la longitud de onda o en el ángulo de incidencia; produciendo interferencia destructiva o lo que es lo mismo, eficiencias mínimas.

Multiplexado espectral

Quebrantar la condición de Bragg es posible variando la longitud de onda λ durante la reconstrucción del holograma. Esta técnica no requiere variaciones en la dirección de propagación del haz, pero si requiere un láser compacto y rápidamente sintonizable con suficiente potencia y coherencia, en el rango de ~100 nm o más en el visible. Los cambios de la longitud de onda necesarios para reducir la eficiencia de difracción del máximo a cero son del orden de 10, 2, 1 y 0.2 nm para medios de espesor de 0.1, 0.5, 1 y 5mm, respectivamente [2.4].

Multiplexado mediante codificación de la fase

Esta técnica se basa en el registro de un holograma mediante múltiples ondas de referencia, cada una con una fase particular, interfiriendo simultáneamente en el haz objeto. La diferencia de un holograma a otro es la selección de las fases de las ondas de referencia. Por ejemplo, para multiplexar dos imágenes, la imagen A se registra con un conjunto de fases ($\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 0$) de las ondas de referencia, y la imagen B con un conjunto de fases $\left(\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi\right)$ de las mismas. Si se utiliza este último conjunto de fases durante la lectura de datos se reconstruirá la imagen B. La interferencia

destructiva entre las dos ondas reconstruidas desfasadas π resulta en la extinción de la imagen no deseada, en este caso la imagen A.

El límite de este método es la dificultad de conseguir en un dispositivo práctico los desfases exactos necesarios para producir una interferencia destructiva total, aunado a pequeñas variaciones relativas de intensidad entre los distintos haces de referencia [2.5].

Multiplexado por desplazamiento

Esta técnica, conocida como shift multiplexing, utiliza un haz de referencia con frente de onda esférico. La curvatura de la fase y de las correspondientes franjas de interferencia registradas asegura que desplazamientos del medio relativamente pequeños causen cambios en la eficiencia de difracción. Permitiendo multiplexar varios hologramas mutuamente desplazados pero traslapados. La diferencia entre el multiplexado por desplazamiento y el multiplexado espacial, radica en que en la segunda, los distintos hologramas se registran en varias zonas del medio pero sin superposición entre ellas.

Multiplexado por correlación

Esta técnica se incluye dentro de las técnicas por desplazamiento, ya que se registran en los medios varios hologramas ligeramente desplazados y parcialmente traslapados. Esta técnica utiliza un haz de referencia con una distribución espacial compleja de fase y amplitud que tiene un patrón diferente para cada uno de los hologramas multiplexados. Este método es idéntico a la técnica de multiplexado de hologramas desarrollada por LaMacchia y White en 1967 [2.6].

En resumen, en este capítulo describimos los conceptos básicos de la holografía, los diferentes tipos de hologramas y las diferentes técnicas de multiplexado de hologramas.

De manera que es posible mencionar, que en esta tesis, desarrollaremos un sistema opto-electrónico de grabado holográfico utilizando un cristal fotorrefractivo para grabar hologramas de volumen en una configuración de hologramas de transformada de Fourier y utilizaremos una técnica de multiplexado por desplazamiento.

En el siguiente capítulo, se describirá en forma general un sistema de almacenamiento holográfico de información.

REFERENCIAS

[2.1] Hecht “Óptica”, Addison Wesley, Tercera Edición, España; 1998.

[2.2] R. J. Collier, “Optical holography”, Academic Press, Nueva York, 1971.

[2.3] J. Hong, P. Yeh, D. Psaltis, D. Brady, “Diffraction efficiency of strong volume holograms”, Optics Letter, Vol. 15, 1990.

[2.4] F.H. Mok, G.W. Barr, D. Psaltis, ”Spatially and angle multiplexed holographic random access memory”, Photonic Neural Networks, Vol. 1773, 1992.

[2.5] M. Calvo Padilla “Óptica Avanzada”, Editorial Ariel, Barcelona España, 2002.

[2.6] J. T LaMacchia., D. L. White, “Coded Multiple Exposure Holograms”, Applied Optics, Vol. 7, 1968.

CAPÍTULO 3

ALMACENAMIENTO HOLOGRÁFICO DE INFORMACIÓN

3.1 Sistema óptico para el almacenamiento holográfico de información

Un sistema óptico típico de almacenamiento holográfico de datos para almacenar información está representado conceptualmente en la Fig. 3.1 [3.1, 3.2]. El sistema consiste básicamente en un arreglo interferométrico.

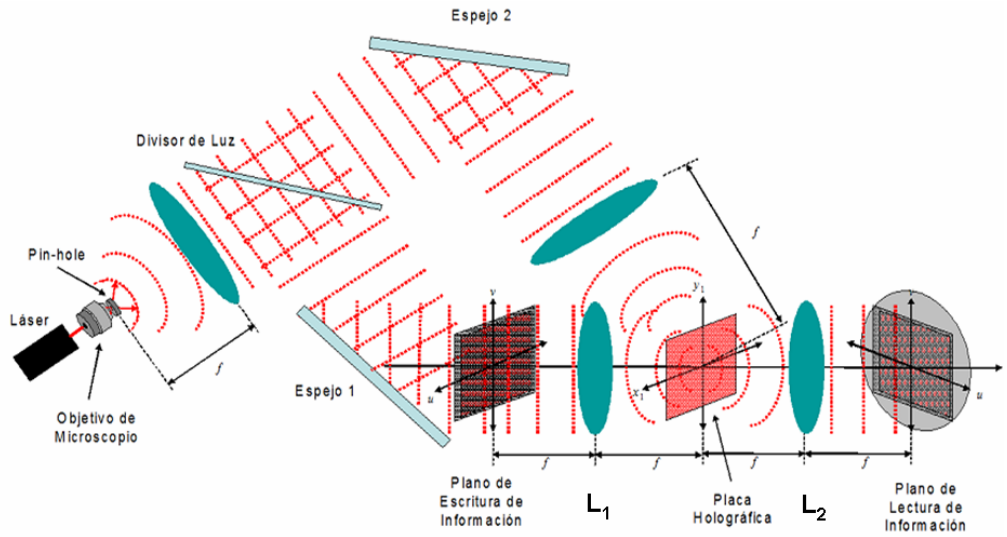


Figura 3.1 Diagrama esquemático para almacenar información en forma de hologramas de Fourier.

Al ser un sistema interferométrico, este debe cumplir con ciertas características como, por ejemplo poseer una fuente de luz que posea cierta coherencia temporal.

Generalmente, la fuente de luz en los sistemas de almacenamiento holográfico es un láser, ya que asegura el máximo contraste del patrón de interferencia en la región del registro. En el caso de redes de gran espesor, el láser debe poseer además una buena estabilidad de longitud de onda a largo plazo, lo cual se debe a la alta selectividad espectral de la red. La potencia del láser también es importante, debido a que cuando el flujo de fotones es grande los tiempos de escritura y lectura pueden ser menores, de forma que aumenta el flujo de datos. En los recientes prototipos de memorias holográficas el orden de la fuente es de alrededor de 100mW [3.3 - 3.9]. La selección de longitud de onda depende de la sensitividad espectral del medio de registro utilizado, por ejemplo, azul-verde para los foto polímeros o rojo para los polímeros fotorrefractivos. Un ejemplo sería el láser de Nd:YAG que emite en 532 nm, o bien, el láser de semiconductores con emisión entre 630 y 690 nm.

El haz de luz que identificaremos como haz objeto (Fig. 3.1), es modulado espacialmente en el plano de escritura por una función de transmitancia $t(x,y)$, que representa la información que se desea almacenar. Posteriormente, en el plano de la placa holográfica situado a una distancia igual a la distancia focal de la lente L_1 se obtiene una distribución de amplitud compleja proporcional a la transformada de Fourier del objeto con transmitancia $t(x,y)$, colocado en el plano de escritura [3.1, 3.2], es decir,

$$T(x_1, y_1) \propto kt(u,v). \tag{3.1}$$

Este campo luminoso interfiere con el campo luminoso del otro haz (haz de referencia) proveniente del espejo 2 en la Fig. 3.1, que se convierte en un frente de onda esférico convergente gracias a la lente que se encuentra entre este espejo y el medio de grabado. De esta manera el patrón de interferencia registrado en el medio de registro, contiene la información de

la transformada de Fourier de la transmitancia $t(u,v)$ [3.1, 3.10 - 3.13]. Se puede distinguir en el diagrama de la Fig. 3.1, que existe otro sistema 2f entre el cristal y el plano de lectura; gracias al cual se puede enfocar la imagen invertida de la transmitancia $t(u,v)$. Esto puede explicarse gracias al teorema de la doble transformada de Fourier,

$$TF\{TF\{t(u,v)\}\} = t(-u,-v). \tag{3.2}$$

El patrón de interferencia causa cambios físico-químicos en el medio, sobre todo en las zonas iluminadas del patrón, acompañados por el cambio de propiedades ópticas tales como la parte real del índice de refracción complejo, el coeficiente de absorción o ambos. Como se mencionará más adelante existen diversas formas de aumentar la densidad de almacenamiento, una de ellas es multiplexar en el mismo volumen varias redes mediante la selectividad angular o espectral del efecto de Bragg.

De acuerdo con el principio holográfico, la iluminación de la red holográfica por un haz similar al haz de referencia produce un campo difractado que contiene la información originalmente contenida en el haz objeto. Este campo se captura mediante una cámara produciendo una señal eléctrica a partir de la cual, una vez procesada, se recupera la información almacenada. En sí, el almacenamiento y recuperación holográfica es un proceso que involucra principios fundamentales de la naturaleza ondulatoria de la luz.

3.2 Componentes del sistema óptico

De acuerdo a la Fig. 3.1, en el plano de escritura es necesario tener o desplegar la información a grabar en una placa holográfica. En nuestro caso, en este plano utilizaremos una LCD como modulador espacial de luz.

Los moduladores espaciales de luz (SLM, Spatial Light Modulator) se clasifican según su forma de direccionamiento en:

- Moduladores de direccionamiento óptico.
- Moduladores de direccionamiento electrónico.

Un ejemplo de un modulador espacial de luz de direccionamiento electrónico seria uno basado en cristales líquidos.

Un cristal líquido es una sustancia que se caracteriza porque al ser sometido a un campo eléctrico, sus moléculas se reordenan según la magnitud de dicho campo. La estructura básica de un LCD, se puede observar en la Fig. 3.2.

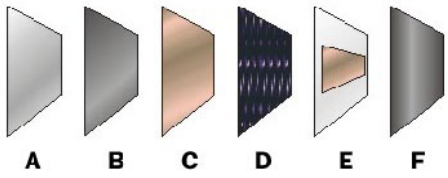


Figura 3.2 Estructura básica de un LCD: (a) Espejo, (b) Filtro polarizador vertical, (c) Electrodo transparente, (d) Cristal líquido, (e) 2do electrodo transparente, y (f) Filtro polarizador horizontal.

En un LCD, el material del cristal líquido está organizado en capas sucesivas; la posición de las moléculas de cada capa está ligeramente desfasada unas de otras, de tal manera que entre la primera y la última capa hay un desfase total de 90º cuando no hay influencia de ningún campo eléctrico, como se puede observar en la Fig. 3.3.

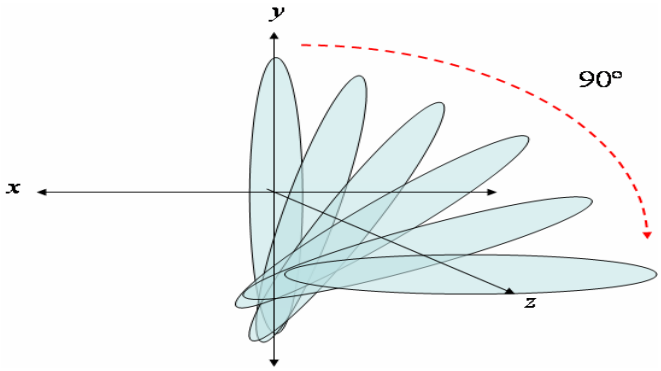
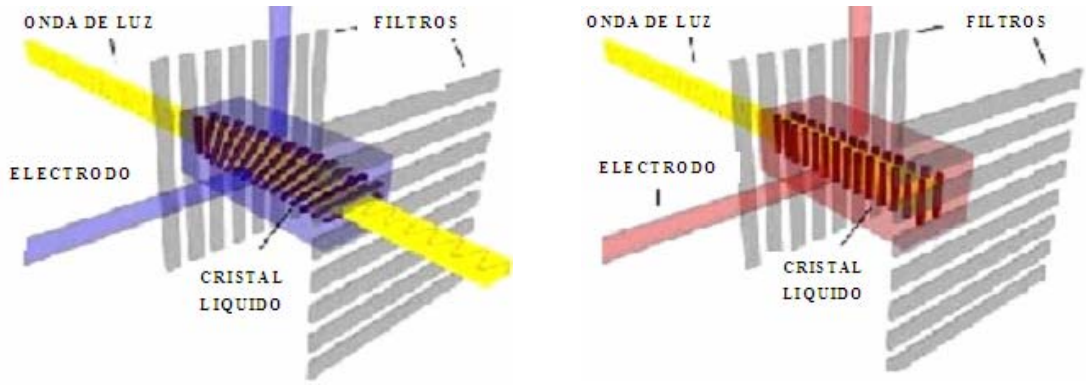


Figura 3.3 Orientación de las moléculas del cristal líquido en un LCD.

La luz que proviene del exterior con polarización aleatoria, es filtrada por el polarizador vertical. De manera que solo luz con polarización lineal vertical, incide en el cristal líquido. Cuando la luz se encuentra viajando a través del cristal líquido y éste no está sometido a ningún campo eléctrico, su polarización a la salida de dicho cristal esta desfasada 90º con respecto a su polarización de incidencia; es decir, tiene una polarización horizontal. Ya que la polarización de la luz que sale del cristal líquido es horizontal, el filtro polarizador horizontal es transparente a ella, y por tanto toda la luz es transmitida. Este proceso se ilustra en la Fig. 3.4a. En la Fig. 3.4b se puede observar el proceso de transmisión de la luz a través de un LCD, cuando el cristal líquido esta siendo expuesto a un campo eléctrico. En este caso, la luz al salir del cristal líquido tiene la misma polarización que al incidir, ya que las moléculas de dicho cristal se reorientaron por la presencia de un campo eléctrico. De esta manera el filtro polarizador horizontal obstruye en su totalidad la luz que incide en él.



(a) (b)

Figura 3.4 Proceso de transmisión de luz a través de un LCD [3.1]: (a) En ausencia de campos eléctricos, y (b) En presencia de campos eléctricos.

En la práctica las pantallas LCD, son arreglos matriciales de píxeles, donde cada píxel es un pequeño arreglo. Típicamente, pueden ser nemáticos o ferroeléctricos, con velocidades de trama del orden de 30 ms y 100 μs respectivamente y con resoluciones de 1024x1024 pixeles cuyo tamaño varia en el rango de 15 – 20 μm.

La calidad de un holograma depende en mucho del medio de grabado. Hoy en día se han desarrollado un sin numero de materiales holográficos, tales como fotopolímeros, materiales fotorrefractivos inorgánicos y orgánicos, gelatinas dicromatadas, haluros de plata, fotorresinas, vidrios sol-gel, entre otros; pero desafortunadamente no todos reúnen las características requeridas en las aplicaciones de almacenamiento de datos.

Las siguientes son algunas de las características que definen a un buen material.

- *Espesor del material*

Para asegurar difracción en el régimen de Bragg con alta selectividad angular o espectral necesaria para el multiplexado, es necesario que el material tenga un espesor suficiente, típicamente del orden de décimas de mm. Debe considerarse también, que en los procesos de registro, revelado o

fijado holográfico no existan cambios en el espesor ni en el índice de refracción del material, porque de haberlos, pueden aparecer ciertas modificaciones en el camino óptico que separe las franjas holográficas o bien, cambie la inclinación de las mismas.

- *Rango Dinámico*

Para realizar un multiplexado con un alto número de hologramas se necesitan materiales que puedan producir altas modulaciones del índice de refracción Δn. Una característica de estos materiales, es que poseen un alto rango dinámico. La teoría de ondas acopladas propone que la eficiencia de difracción de una red de fase con franjas planas no inclinadas [3.14] viene dada por,

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos\alpha'}\right), \tag{3.3}$$

donde, *d* es el espesor del material, α' es el ángulo de incidencia del haz de reconstrucción dentro del material, y λ la longitud de onda del haz en el vacío. En memorias holográficas, en lugar de dedicar a una única red el rango dinámico completo, éste se divide entre las redes a multiplexar, asignando a cada una de ellas un pequeño índice de modulación, obteniendo una eficiencia de difracción de $\eta_i \sim d\Delta n_i$; de forma que,

$$M\ \# = \sum_{i=1}^{N} \eta_i^{\,1/2} \approx d \sum_{i=1}^{N} \Delta\eta_i = d\,\Delta n\ , \tag{3.4}$$

En la Ec. 3.4, M# es un parámetro conveniente para comparar diferentes materiales, debido a que esta relacionado con las eficiencias de difracción de los hologramas multiplexados y con la energía de las imágenes

reconstruidas. De la Ec. 3.4 se desprende el hecho de que grabando una red de N hologramas con eficiencias idénticas individuales η_i en un medio con M#, la eficiencia seria

$$\eta_i = \left(\frac{M\#}{N} \right)^2, \tag{3.5}$$

La Ec. 3.5 describe perfectamente la relación inversamente proporcional de la eficiencia respecto al número de hologramas de la red.

- *Sensitividad*

  La sensitividad de un material holográfico puede definirse como

$$S_l = \frac{\Delta n}{E} \left[cm^2 / J \right], \tag{3.6}$$

donde Δn es la modulación del índice de refracción y E, es la energía de exposición por unidad de área. Esta característica es importante porque de ella depende el número de fotones para registrar un holograma, permitiendo utilizar láseres de menor potencia o bien un menor tiempo de grabado.

Hasta aquí hemos descrito las características que debe cumplir el medio de grabado. Como se menciona anteriormente, en nuestro caso el medio de grabado es un cristal fotorrefractivo. A continuación, describiremos el funcionamiento de estos cristales.

3.2.1 Cristales fotorrefractivos

En 1966 Ashkin y sus colaboradores de los laboratorios Bell, observaron cambios en el índice de refracción inducidos ópticamente en cristales ferroeléctricos de niobato de litio, $LinbO_3$ y tantalato de litio, $LiTaO_3$. Dos años después Chen et al [3.15], sugirieron que este fenómeno, llamado efecto fotorrefractivo, podría tener aplicaciones interesantes, por ejemplo almacenamiento holográfico de datos. Desde entonces, este efecto ha sido observado en diferentes materiales [3.16].

El efecto fotorrefractivo se observa cuando un material fotoconductor se expone a un perfil de iluminación no uniforme, por ejemplo el creado por un patrón de interferencia durante el registro holográfico, los portadores se generan en las regiones de máxima intensidad de luz (Fig. 3.5). Posteriormente, dichos portadores migran de las posiciones de alta intensidad donde fueron generados, a regiones obscuras donde son atrapados por las impurezas del material (trampas). Al moverse los portadores, los iones generados se mueven a las regiones de alta intensidad de luz.

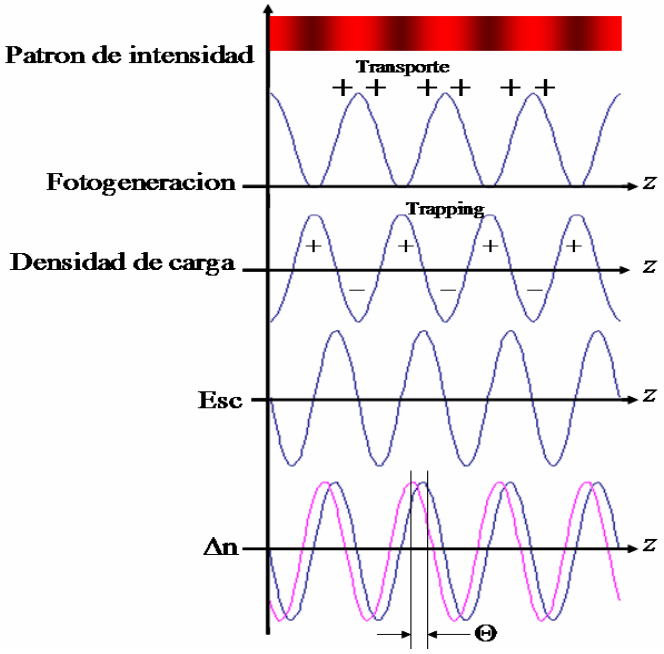


Figura 3.5 Reacciones físicas durante el fenómeno fotorrefractivo.

La distancia característica que los portadores migran en un material fotorrefractivo eficiente, se encuentra entre 1 nm a 1μm. Los portadores atrapados en las regiones obscuras y los iones de carga fijos en las regiones brillantes, dan origen a una distribución de carga espacial no-homogénea con densidad $\rho(x)$. La distribución de carga está en fase con la distribución de luz si el transporte está gobernado solamente por difusión, y puede ser desplazado en fase cuando se presenta una deriva (drift) en respuesta al campo eléctrico.

Suponga un cristal que contiene un solo tipo de trampas inmóviles, con concentración N, en donde son atrapadas las cargas libres. Una parte de esas trampas, N_v está vacía y otra parte, $N_{OC} = N - N_v$ está ocupada por las cargas libres atrapadas. Suponga también que la conductividad se debe a un único tipo de carga portadora (electrones) despreciando la contribución de los huecos. En el $LinbO_3$:Fe las trampas ocupadas son iones Fe^{+2} que tienen su banda de absorción en el visible y la absorción de un fotón por las mismas

excita un electrón que pasa a la banda de conducción, dejando vacante la trampa en el estado oxidado Fe^{+3}.

Los electrones que se hallan en la banda de conducción se desplazan por el cristal mediante corrientes de difusión, arrastre o por efecto fotovoltaico de volumen, y puede recombinarse con otras trampas vacías Fe^{+3} situadas en lugares distintos de donde se originaron, redistribuyendo la carga y dando origen al campo de carga espacial E_{sp}. La redistribución entre las trampas vacías y ocupadas se puede expresar como,

$$\frac{dN_{OC}}{dt} = -(\beta + qsI)N_{OC} + N_v n_e \gamma , \tag{3.7}$$

donde β es el coeficiente de generación térmica de electrones, q es la eficiencia cuántica de la excitación de un electrón tras la absorción de un fotón, s es la sección eficaz de absorción de fotones, I es la intensidad del flujo incidente de fotones, γ es el coeficiente de recombinación, y n_e es la concentración de electrones libres en la banda de conducción [3.1].

La corriente de difusión $\mathbf{J}_{dif}$ se origina por los gradientes espaciales de la concentración de cargas libres causadas por la iluminación no uniforme, y es el proceso dominante cuando no se aplican campos eléctricos externos. Ésta se expresa como,

$$J_{dif} = eD\nabla n . \tag{3.8}$$

La corriente de arrastre $\mathbf{J}_{arr}$ resulta de la interacción de cargas con el campo eléctrico E; el cual puede complementarse del campo aplicado externamente E_0, el campo espacial E_{esp} producido por la predistribución de cargas, y el campo piroeléctrico E_{pir}. La corriente de arrastre $\mathbf{J}_{arr}$ se define en términos de la ley de Ohm como,

$$\mathbf{J}_{arr} = \hat{\sigma}\mathbf{E} = e\hat{\mu}_e n_e \mathbf{E}. \tag{3.9}$$

La corriente fotovoltaica J_{fv} está formada por las cargas excitadas de las posiciones no centrosimétricas, sobre las que los átomos vecinos ejercen fuerzas asimétricas (debido a la anisotropía del medio), provocando que éstas se muevan solo en ciertas direcciones dando lugar a la corriente fotovoltaica. El efecto fotorrefractivo ha sido observado en diferentes materiales como por ejemplo $BaTiO_3$, $KTa_xNb_{x-1}O_3\,(KTN)$, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, silenitas $Bi_{12}Si$, semiconductores, cerámicas, etc. El más utilizado es el $LiNbO_3$, debido a sus buenas propiedades holográficas como la sensitividad de grabado o borrado que pueden controlarse mediante el uso de dopantes.

Analizado el elemento de grabado de los hologramas en nuestro sistema, es necesario mencionar el dispositivo de captura propuesto para realizar la lectura de información. Con este fin, los dispositivos comúnmente utilizados son los detectores.

Los detectores CCD (Charge- Coupled Device por sus siglas en inglés) y CMOS APS (Complementary Metal- Oxide- Semiconductor Active pixel sensor por sus siglas en inglés) han sido ampliamente utilizados en sistemas holográficos de almacenamiento de datos debido a su alta resolución, alta velocidad de lectura y buena sensitividad en el visible. Estos detectores utilizan pixeles de silicio para absorber fotones y generar flujo de fotoelectrones. Actualmente, los tamaños de los pixeles de los moduladores espaciales son del orden de 15μm y de los detectores del orden de 5μm, permitiendo el sobre muestreo de la imagen con el fin de mejorar la calidad. Las velocidades de lectura llegan a ser de hasta 15Mpixels/s, en 64 canales paralelos y de 524Mpixels/s en el CMOS APS de photobit Corporation [3. 17].

Hasta aquí se ha descrito al sistema óptico común utilizado por un sin numero de autores para almacenar hologramas dentro de diferentes medios [3.13]. Mencionando además las características técnicas y funcionamientos de los componentes implementados experimentalmente dentro del sistema óptico en cuestión; enfatizando en las propiedades físicas de los medios de registro holográfico.

Nuestra propuesta consiste en aplicar un sistema óptico de procesamiento de información, con arquitectura de una sola lente. Es decir, una sola lente se encarga tanto de formar la imagen como de obtener el patrón de Fraunhofer de la señal de entrada. El sistema óptico puede observarse en la Fig. 3.6.

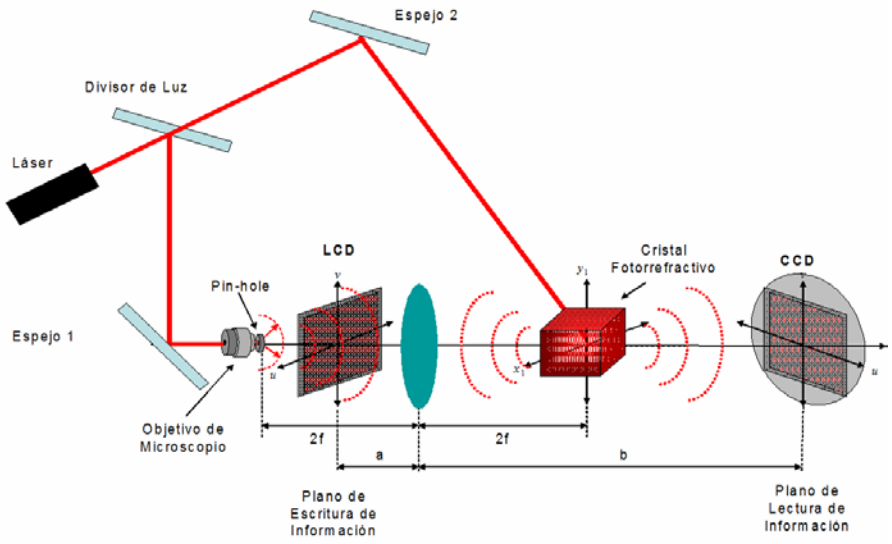


Figura 3.6 Sistema óptico de la propuesta

En este trabajo de tesis se utiliza una LCD como modulador espacial de luz, y una cámara CCD como dispositivo de lectura de la información grabada.

La arquitectura de la memoria holográfica volumétrica reconfigurable se abordará en el siguiente capítulo.

REFERENCIAS

[3.1] P. Cheben, M. A. Calvo “Óptica Avanzada”, Ariel Ciencia, España, 2002.

[3.2] W. Goodman “Introduction to Fourier Optics”, McHill, USA 2000.

[3.3] H.J. Coufal, D. Psaltis, G.T. Sincerbox “Holographic Data Storage”, Springer, USA, 2000.

[3.4] B. Hill “Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory”, Applied Optics, Vol. 11, No. 1, 1972.

[3.5] L.D. D´auria, J. P. Huignard, E. Spitz “Holographic Read-Write Memory and Capacity Enhancement by 3-D Storage”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. MAG-9, No. 2, 1973.

[3.6] P. Várhegyi, P. Koppa, E. Lörincz, G. Szarvas, P. Richter “Optimization of the storage density in thing polarization holograms”, SPIE, Vol. 4149, 2000.

[3.7] T. Ujvári, P. Koppa, M. Lovász, P. Várhegyi, Sz. Sajti, E. Lörincz, P. Richter, “A secure data storage system based on phase-encoded thing polatization holograms”, Applied Optics, Vol. 6, 2004.

[3.8] P. Várhegyi, P. Koppa, F. Ujhelyi, E. Lörincz “System modeling and optimization of Fourier holographic memory”, Applied Optics, Vol. 44, 2005.

[3.9] E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marts, N. Massey “Holographic Data Storage in Three-Dimensional Media”, Applied Optics, Vol. 5, No. 8, 1966.

[3.10] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín “Memoria Holográfica Automática”, IEEE proceedings, Congreso Interuniversitario de Electrónica, Computación y Electricidad. Sonora, México, 2006.

[3.11] V. Heerden “Theory of Optical Information Storage in Solids”, Applied Optics, Vol. 2, No. 4, 1963.

[3.12] H.J. Coufal, D. Psaltis, G.T. Sincerbox “Holographic Data Storage”, Springer, USA, 2000.

[3.13] G. Sincerbox (Ed.), “Selecter Papers on Holographic Storage”.SPIE press, V. MS95, 1994.

[3.14] F.H. Mok, G.W. Barr, D. Psaltis, “ System metric for holographic memory systems”, Optics Letter, 21, 896, 1996.

[3.15] M. Ohira M, Z. Chen, T. Kasamatsu, “Crystal growth LinbO3:Fe and its photorefractive properties!, Applied Optics Vol. 30 No. 98, 1991.

[3.16] J. C. Ramírez, “Procesos Holográficos en Polímeros Fotorrefractivos”, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; 2000.

[3.17] D. P. Resler, D. S. Hobbs, R. C. Sharp, L. J. Friedman, L.J. y , T. A. Dorschner, Optical Letter, Vol. 21, 1996.

CAPÍTULO 4

MEMORIA HOLOGRÁFICA VOLUMÉTRICA RECONFIGURABLE: ARQUITECTURA BÁSICA

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se describió al sistema óptico típico que se implementa experimentalmente para almacenar información en forma de hologramas de Fourier dentro de medios de registros holográficos. En dicho capítulo se mencionaron también las características técnicas y funcionamientos de los componentes del sistema óptico típico, haciendo énfasis en los requisitos generales que debe de tener un medio holográfico.

Partiendo de estas bases, este capítulo inicia con la descripción de la memoria holográfica volumétrica reconfigurable, desarrollada en este trabajo de tesis, la cual consiste en una modificación de la arquitectura tradicional del sistema formador de imágenes de doble lente por una arquitectura de formación de imágenes con una sola lente; incluyendo un cristal fotorrefractivo como medio de registro de la información almacenada en forma de hologramas tipo Fourier.

Para realizar una mejor descripción de la arquitectura de la memoria holográfica volumétrica reconfigurable, en la Fig. 4.1 se presenta un diagrama a bloques. A continuación, se describe a detalle cada uno de los bloques del sistema.

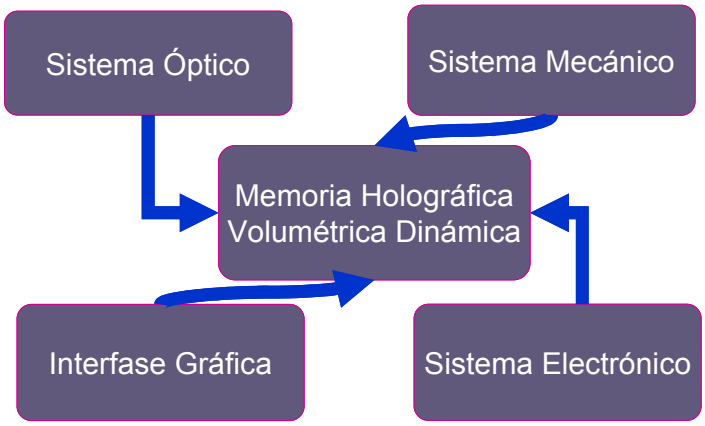


Figura 4.1 Diagrama de bloques de la memoria holográfica volumétrica

4.2 Sistema Óptico

Un diagrama a bloques del arreglo experimental desarrollado para la presente tesis se puede observar en la Fig. 4.2. El arreglo consiste básicamente en un sistema óptico de una sola lente, en donde solamente el haz objeto es expandido y filtrado por un objetivo de microscopio y el micro agujero (pin-hole). El patrón de interferencia registrado en el cristal fotorrefractivo, contiene la información de la transformada de Fourier $t(u,v)$ de la transmitancia $t(x,y)$. De acuerdo con Goodman [4.2], dos planos dentro de un sistema óptico serán planos conjugados cuando la distribución de la intensidad a través de un primer plano es una imagen de la distribución de la intensidad a través del segundo.

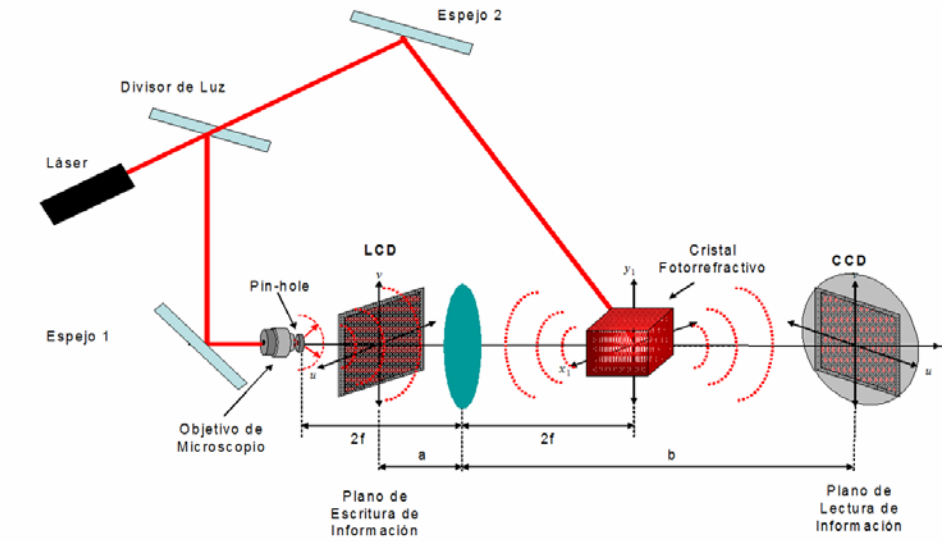


Figura 4.2 Sistema óptico de la memoria holográfica volumétrica

Esto se debe a que el plano del pin-hole (plano objeto) y el plano en el que converge el haz (plano imagen) dentro del cristal a una distancia 2f del lente, son conjugados. El plano donde converge el haz se denomina plano de Fourier, ya que en éste, el campo luminoso es proporcional a la transformada de Fourier de la transmitancia que modula al haz esférico divergente que emerge del pin-hole [4.1]. Las distancias entre el plano de escritura y la lente, a, y la distancia entre la lente y el plano de lectura, b, del diagrama de la Fig. 4.2, se disponen de manera que experimentalmente el plano de escritura y el plano de lectura sean planos conjugados. Esto, ya que la transformada de fourier siempre se formará en el plano donde se forme la imagen de la fuente [4.2]. En otras palabras, la transformada de fourier del plano objeto (pin-hole) se forma en el plano imagen del objeto y sobre el mismo objeto.

La principal ventaja del sistema propuesto, es que al tener una menor cantidad de componentes ópticos, éste es más compacto, y mecánicamente estable; comparado con los sistemas desarrollados hasta el día de hoy [4.3].

En el sistema óptico propuesto, en el plano de escritura de la información se adaptó una LCD para que funcione como un modulador reconfigurable, la cual se controla con una PC. La LCD utilizada es de la marca CRL OPTO®, modelo 6045VGA con 640 x 480 píxeles de resolución. Dicha pantalla es manipulada desde la computadora mediante el periférico S-VGA; sus dimensiones y características principales se observan en la Fig. 4.3.

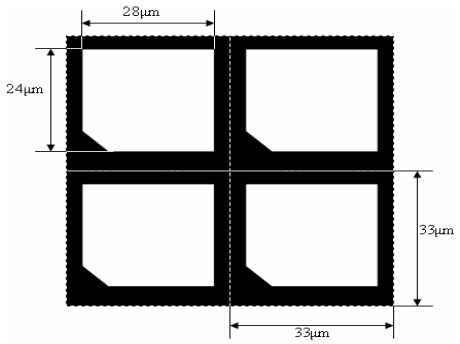


Figura 4.3 Resolución espacial de los píxeles de la pantalla LCD.

Para asegurar una área de trabajo de 200 x 120 píxeles, experimentalmente se despliega en la LCD un patrón binario de 8 x 8 píxeles, es decir que cada píxel del patrón esta sobre-muestreado por 25 x 15 píxeles de la pantalla. La tabla 4.1 presenta las dimensiones de cada píxel de la pantalla LCD.

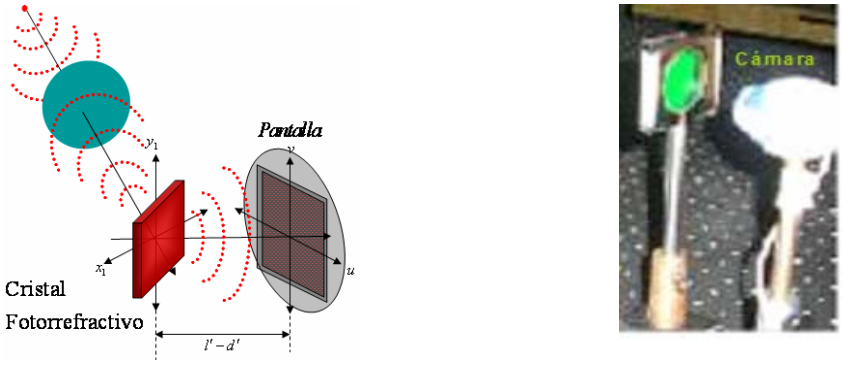
Tabla 4.1 Dimensiones características de la pantalla LCD

	Horizontal	Vertical
Resolución Espacial (No. De Píxeles)	800	600
Dimensión del Píxel	31 μm	31 μm

Para capturar la información grabada en el material de registro, es necesario tener un elemento de captura. En este caso, en el plano de

observación se ubica una cámara CCD (Charger Coupled Device). La cámara CCD tiene una resolución de 100k pixel, la cual es cuatro veces mayor a la resolución de la LCD [4.3]. La CCD empleada es de la marca Chicony®, y es controlada a través del puerto USB mediante el software proporcionado por el fabricante.

El uso de esta cámara en el sistema propuesto reduce en un 25% el costo total, debido a la sencillez de la misma, que no significa ningún tipo de limitación al sistema en general. La Fig. 4.4 ilustra el bosquejo de la cámara CCD y su ubicación en el sistema experimental.



(a) (b)

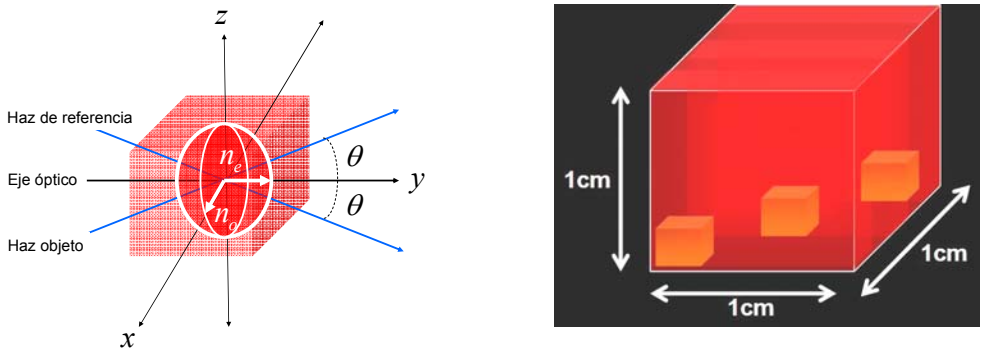
Figura 4.4 Cámara CCD ubicada en el plano de lectura del sistema experimental: (a) Posición de la cámara CCD en el sistema, y (b) Cámara CCD empleada.

El software de este elemento es manipulado mediante un programa desarrollado en LabVIEW®, el cual se describirá en la sección 4.5 del presente capítulo.

4.2.1 Caracterización del cristal fotorrefractivo $LinbO_3$:Fe

Como se ha mencionado con anterioridad, el material de grabado de los hologramas es un cristal fotorrefractivo de niobato de litio dopado con

fierro al 2% ($LinbO_3$:Fe). Este tipo de material presenta una polarización innata debido a su naturaleza, permitiendo una bipolaridad sin presencia de campos eléctricos externos [4.10]. Experimentalmente, el cristal está colocado con su eje óptico de forma horizontal [4.3 - 4.4] como se observa en la Fig. 4.5 (a). En la Fig. 4.5 (b) pueden observarse las dimensiones físicas del cristal fotorrefractivo y un ejemplo de cómo seria una distribución de la red holográfica grabada en el cristal.



(a) (b)

Figura 4.5 Características del cristal fotorrefractivo empleado: (a) Eje óptico del cristal, y (b) Dimensiones físicas del cristal.

Ya que la eficiencia de difracción y la modulación del índice de refracción dependen de las características ópticas del cristal fotorrefractivo utilizado, fue necesario realizar una caracterización del mismo. Inicialmente para su caracterización se establecieron teóricamente las relaciones entre las magnitudes, las intensidades y tiempos de la eficiencia de difracción y la modulación del índice de refracción. Experimentalmente el cristal está colocado con su eje óptico de forma horizontal [4.3] y debido a que los ángulos con respecto a los dos haces son iguales (Fig. 4.5a), el índice de refracción al interior del cristal será el mismo para ambos haces.

Considerando que el ángulo de incidencia de los haces con respecto al eje es θ y que el índice de refracción que se encuentra a su paso es el índice ordinario n_o; el patrón de interferencia en función de las intensidades de estos haces es,

$$I_T = I_{O1} + I_{R1} + 2\sqrt{I_{O1} I_{R1}} \cos\left(4\pi n_O \frac{\sin(\theta)}{\lambda} y \right). \qquad (4.1)$$

En donde I_{O1} es la intensidad del haz objeto medida después del cristal e I_{R1} es la intensidad del haz de referencia después del cristal.

Por tanto la modulación del índice de refracción puede establecerse en función de la modulación debida a la componente de CD (Corriente Directa) Δn_{CD}, más la correspondiente al contraste de las franjas de interferencia de CA (Corriente alterna) Δn_{CA} [4.5-4.6],

$$\Delta n(t, y) = \Delta n_{CD}(t) + \Delta n_{CA}(t) \cos\left(4\pi n_O \frac{\sin(\theta)}{\lambda} y \right). \qquad (4.2)$$

Para encontrar la dependencia temporal de la modulación del índice se calculó experimentalmente la eficiencia de difracción de cada holograma; mediante, el cociente de la potencia del haz objeto emergente P_{O3}, y la suma de éste con la potencia del haz de referencia emergente al momento de lectura $P_{03} + P_{R3}$ [4.10]. Una vez calculada la eficiencia, la modulación resulta ser [4.7 – 4.9]

$$\Delta n(t) = \frac{\lambda \cos\theta}{\pi L} \cos^{-1}\left[1 - 2\exp\left(\frac{\alpha d}{\cos\theta} \right) \frac{P_{O3}(t)}{P_{R3} + P_{O3}(t)} \right], \qquad (4.3)$$

en donde: L es la máxima longitud horizontal de interacción de los haces dentro del cristal, α y d representan al coeficiente de absorción y a la longitud horizontal del cristal, respectivamente.

Puesto que la dependencia de la modulación del índice de refacción con respecto al contraste de las franjas Δn_{CA} aumenta si se igualan las intensidades de registro $I_{O0} = I_{R0}$ [4.10], se implementó el atenuador que se observa en el esquema de la Fig. 4.6, para la compensación de las pérdidas en la potencia del haz objeto.

Este dispositivo es utilizado para controlar la intensidad del haz de referencia, de manera que se puedan igualar las intensidades de registro y para caracterizar temporalmente la eficiencia y la modulación del índice en función de la intensidad del haz de lectura (I_{R2}). Una vez controladas las intensidades, se obtuvieron los tiempos óptimos para los procesos de registro y lectura de hologramas. El medidor de potencia consiste en un fotodetector 818SL de rango espectral 400-1100 nm, con un medidor de potencia modelo 1830C.

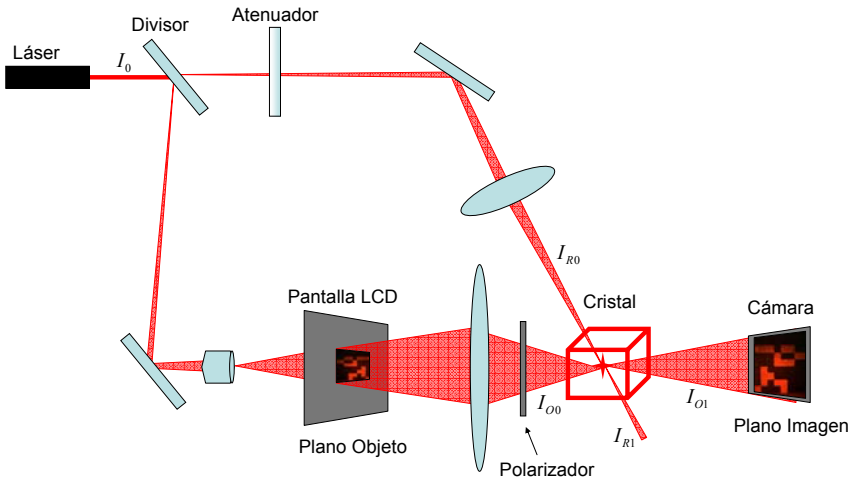


Figura 4.6 Esquema del sistema óptico dinámico implementado para almacenar hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de LiNbO3:Fe.

En el caso de los tiempos de registro la intensidad del haz de referencia incidente permanece constante $I_{R0} = I_{R2}$, mientras que el haz objeto es interrumpido de forma instantánea (sólo el tiempo necesario para que se estabilice el medidor). La interrupción del haz objeto se realizó a

través del control de la pantalla LCD; es decir mientras se registra el holograma, la pantalla despliega un patrón binario, y para interrumpir el haz la pantalla se torna totalmente obscura (ver Fig. 4.7a). Se considera que el tiempo de registro es el óptimo cuando la modulación del índice alcance el 63% del valor de saturación Δn_{Sat}, que se calcula como [4.10],

$$\Delta n_{Sat} = \frac{1}{2} n_o{}^2 r_{13} \left(\frac{e N_A}{\varepsilon_{11} \varepsilon_o} \frac{\lambda}{4\pi \sin(\theta)} \right), \qquad (4.4)$$

donde: r_{13} es el coeficiente electroóptico, e es la carga elemental, N_A es la densidad de trampas Fe^{3+} vacías, $\varepsilon_{11}\varepsilon_0$ es la permitividad eléctrica del cristal [4.10].

De igual forma se considera el tiempo óptimo de lectura, sólo que para este caso se interrumpe definitivamente el haz objeto $I_{O2} = 0$; mientras que se controla la intensidad del haz de lectura I_{R2} (ver Fig. 4.7b). De la Fig. 4.7 se puede concluir que los haces considerados para el cálculo del valor de saturación son los haces emergentes I_{O1} e I_{R1}, debido a que los haces incidentes son modificados al atravesar el cristal.

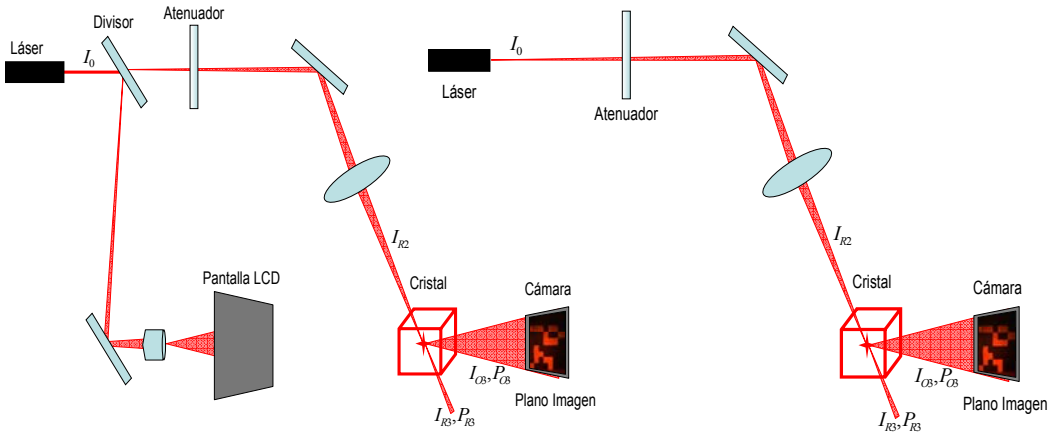
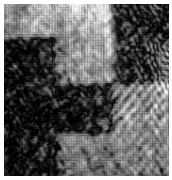
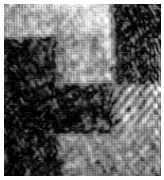
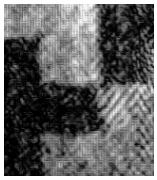
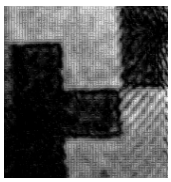
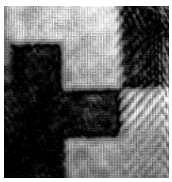
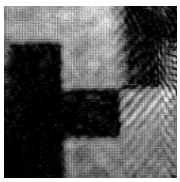
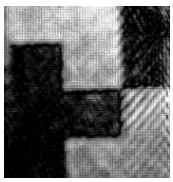
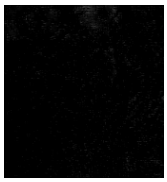


Figura 4.7 Esquemas del sistema óptico dinámico: (a) Medición de potencias de las lecturas, y (b) Medición de las potencias de registro.

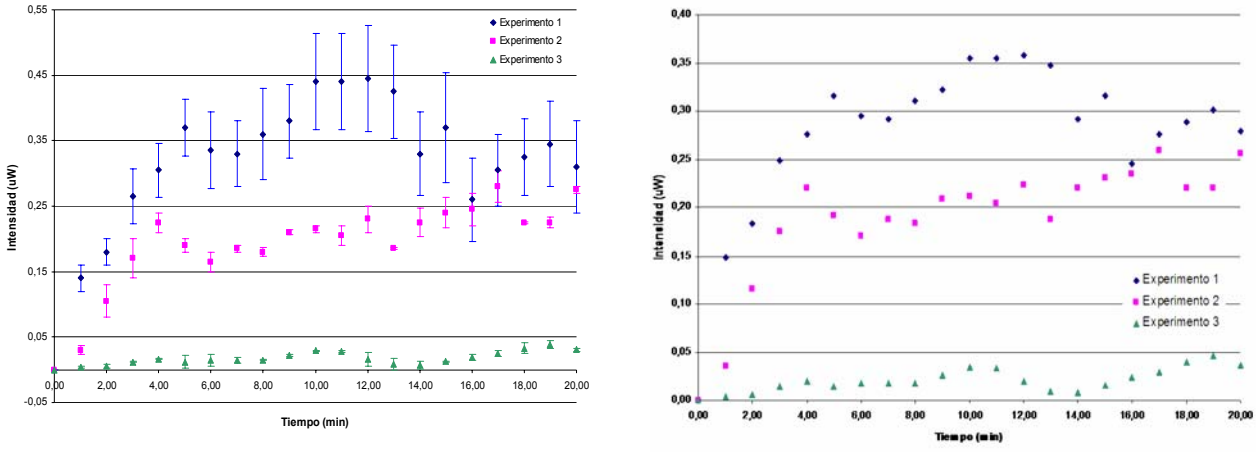
Para conocer la relación entre las intensidades y el tiempo de registro, se realizaron tres experimentos. Cada experimento consiste en mantener constante la intensidad del haz objeto, mientras se varía gradualmente la intensidad del haz de referencia. La variación de la intensidad del haz de referencia va de un valor mínimo a un valor máximo, el cual es función de la dependencia de éste con el contraste de la imagen de salida. Los detalles experimentales y resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Hologramas registrados.

Potencias de escrituras	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.
Experimento 1 $P_{R0} = 2,70\text{mW}$ $P_{O0} = 7,15\mu\text{W}$				
Experimento 2 $P_{R0} = 1,44\text{mW}$ $P_{O0} = 7,15\mu\text{W}$				
Experimento 3 $P_{R0} = 164,47\mu\text{W}$ $P_{O0} = 7,15\mu\text{W}$				

Haciendo referencia a las imágenes de la tabla 4.2, se considera que el tiempo óptimo para el registro de hologramas con las potencias del Experimento 2 es de 5 min.

En el caso del tiempo de lectura, se puede apreciar que para cualquier potencia (ver Fig. 4.8 y 4.9), entre menor sea éste es mejor; ya que de esta manera se minimiza el daño al holograma leído.



(a) (b)

Figura 4.8 Comportamiento temporal de la potencia de los hologramas y la eficiencia de refracción: (a) Gráfica de la potencia, y (b) Gráfica de la eficiencia de difracción.

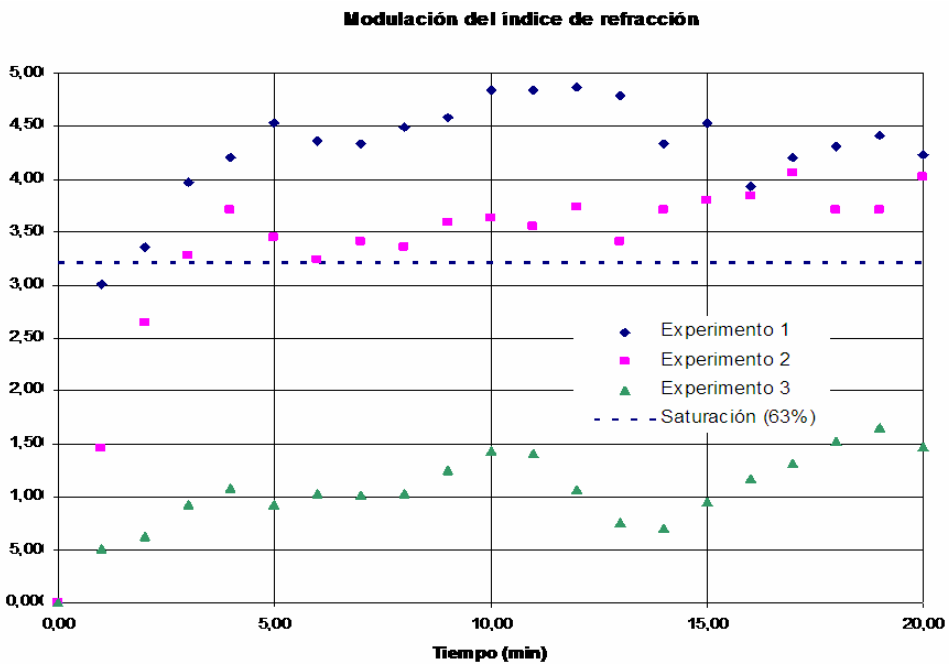
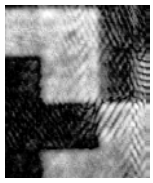


Figura 4.9 Comportamiento temporal de la modulación del índice de refracción del LiNbO3:Fe

Si se comparan los resultados de las Figs. 4.8 y 4.9, se puede observar que el comportamiento temporal de la potencia de los hologramas es similar al comportamiento temporal de la modulación del índice de refracción del cristal.

Con base en los resultados de la Tabla 4.1, se consideran los hologramas de los Experimentos 1 y 2, para obtener de forma apropiada el tiempo y la potencia del haz de lectura. Es decir, variando la potencia del haz se realizó la lectura de los hologramas, hasta que éstos fueran borrados por completo. Los detalles experimentales se pueden observar en las Tablas 4.3 y 4.4; así como en las Figs. 4.10 y 4.11.

Tabla 4.3 Lectura de los hologramas del experimento 1.

Potencias	0 s	10 s	20 s	30 s
Experimento 1A $P_{R2} = 2,70\text{mW}$				
Experimento 1B $P_{R2} = 2,00\text{mW}$				

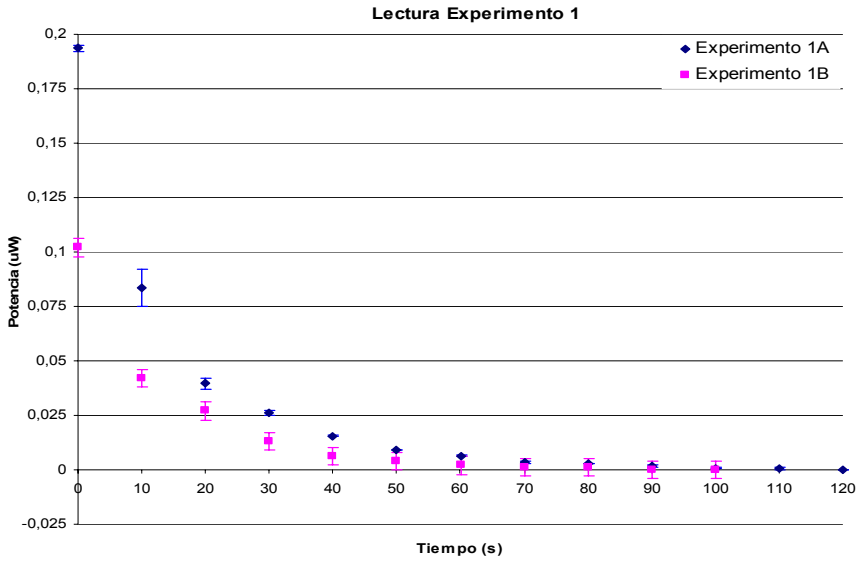


Figura 4.10. Comportamiento temporal de la potencia de lectura de los hologramas obtenidos con el Experimento 1.

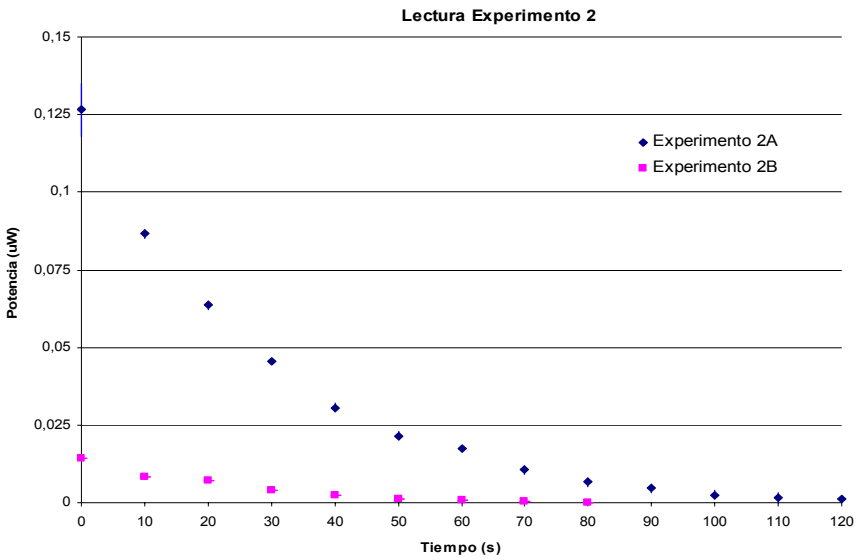


Figura 4.11 Comportamiento temporal de la potencia de lectura de los hologramas obtenidos con el Experimento 2.

Tabla 4.4 Hologramas del experimento 2 leídos.

Potencias	0 s	10 s	20 s	30 s
Experimento 2A $P_{R2} = 1,44\text{mW}$				
Experimento 2B $P_{R2} = 1,00\text{mW}$				

Por simple observación de las imágenes de las tablas 4.2 y 4.3, así como en las gráficas de las figuras 4.10 y 4.11; se concluye que la mejor

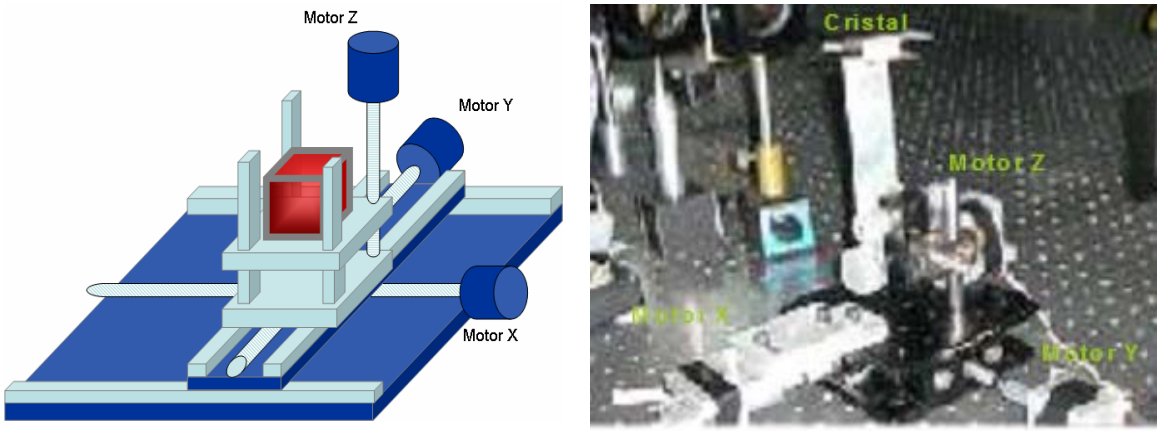
potencia del haz de lectura es 1,44 mW para los hologramas del Experimento 2. Ya que con ésta, la potencia del holograma de salida es suficiente para que la cámara CCD obtenga una imagen con un contraste aceptable para la aplicación posterior; además de que el daño que sufre la distribución del patrón de interferencia grabado en el cristal se minimiza en comparación con potencias mayores de lectura. Este valor puede variar en caso de tener un elemento de captura diferente. Comprobando de esta manera la eficiencia del cristal aplicado a la memoria.

Describiremos ahora el funcionamiento de la memoria, y, de los sistemas mecánicos y electrónicos.

4.3 Sistema mecánico

Para grabar varios hologramas dentro del cristal fotorrefractivo se diseñó e implementó un sistema mecánico de posición espacial para mover al cristal a lo largo de las tres coordenadas x, y y z (Fig. 4.13a), de tal manera que la información sea almacenada y accesada mediante la técnica de multiplexado por desplazamiento [4.11]. El sistema mecánico implementado consta de 3 tornillos sin-fin acoplados mecánicamente a 3 motores PaP (ver secc. A.1 Apéndice A), que controlan el desplazamiento en cada coordenada de manera independiente (Fig. 4.13b).

Los motores de pasos implementados son del tipo bipolar de la marca EADmotos® modelo ZB17BBK-200; su precisión angular es 1.8º por paso, con un torque de 5.4 N-cm. [4.13]. La precisión angular de los motores acoplados a los tornillos sin-fin se convierte en 0,0025 mm. de desplazamiento lineal para los ejes X e Y, y de 0,1428 mm para el eje Z.



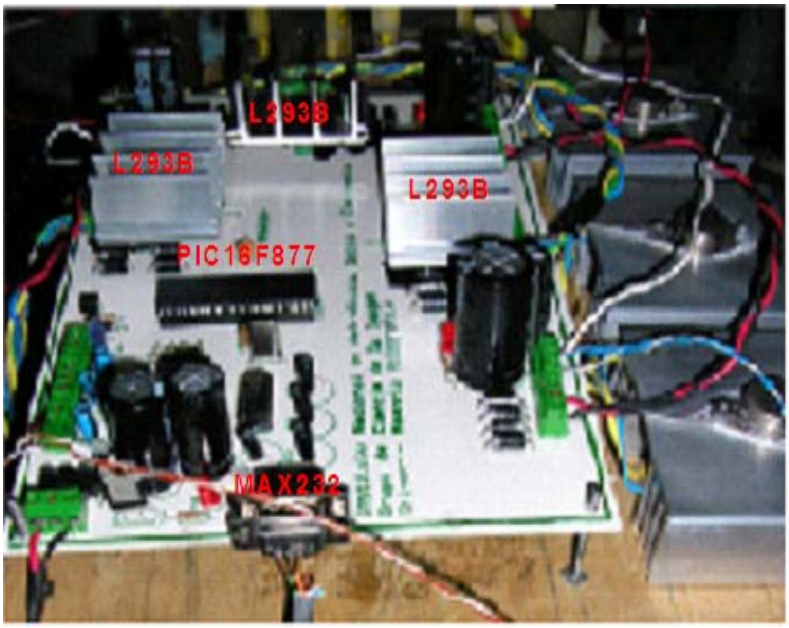
(a) (b)

Figura 4.13 Sistema mecánico de posición de 3D: (a) Isométrico del sistema mecánico, y (b) Ubicación experimental del sistema mecánico.

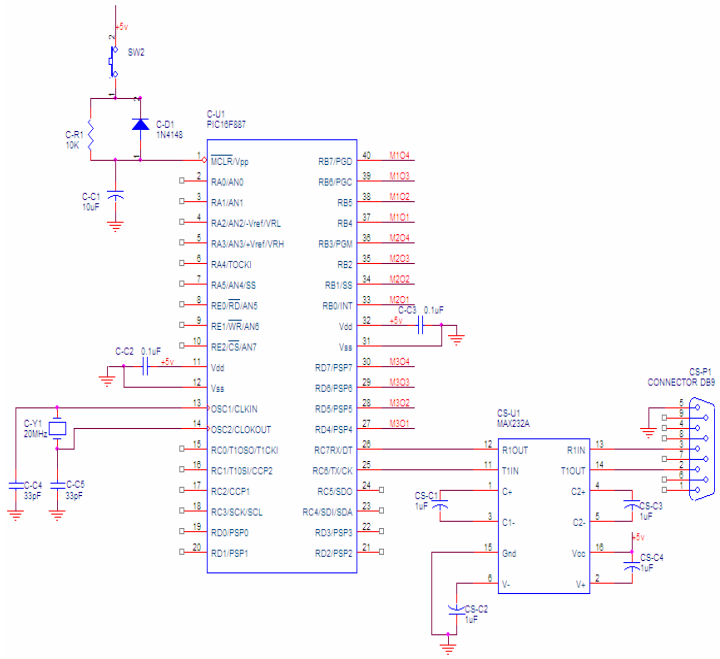
Para realizar un buen control y funcionamiento de la posición de los motores, fue necesario diseñar un sistema electrónico capaz de realizar estas funciones. Todas las instrucciones a ejecutar por la tarjeta electrónica provienen de la PC, que son enviadas a ésta mediante el puerto serial. El software para esta función al igual que los anteriores, fue diseñado en LabVIEW®.

4.4 Sistema electrónico

La comunicación entre los motores y la computadora se realiza por medio del puerto serial, usando como tarjeta de control un sistema electrónico (Fig. 4.14a), ésta consiste básicamente en un microcontrolador PIC16F877 (ver secc. A.3 apéndice A), el cual manipula la posición de los motores a través de tres drivers L293B. Cada uno de los dispositivos L293 cuenta con su propia fuente de alimentación (15v-3A), para prevenir daños a los motores de pasos o al circuito electrónico; debido a posibles sobrecargas mecánicas del sistema. Cabe mencionar que el tipo de control empleado es un control proporcional de lazo abierto.



(a)



(b)

Figura 4.14 Sistema electrónico: (a) Tarjeta electrónica del sistema de posición 3D, y (b) Diagrama esquemático del circuito electrónico.

La posición en el espacio de la información que se desea escribir o leer es transmitida desde el puerto serial de la computadora hasta la tarjeta. Después es recibida por el microcontrolador para que el dispositivo MAX-232, convierta las señales del protocolo RS-232 a TTL (Fig. 4.14b). Posteriormente se ejecuta por el microcontrolador para ser enviada a los motores, y realizar de esta forma el desplazamiento espacial del cristal.

Una vez que se realizó el desplazamiento de los motores de pasos, la información de la posición es retransmitida de manera automática del microcontrolador a la computadora, para que sea verificada. En la secuencia enviada por la computadora, se indican los sentidos de giro y el número de pasos que debe realizar cada motor.

4.5 Software de control

Como se mencionó anteriormente, la interfase gráfica se desarrolló en un software especializado en automatización. En esta interfase el usuario puede de manera continua mover la posición del cristal fotorrefractivo, para acceder a la información que se desee. Otra característica del software es el poder modificar a gusto del usuario los incrementos de avance o retroceso del número de pasos. La Fig. 4.15 ilustra el panel frontal del programa, así como sus características más relevantes.

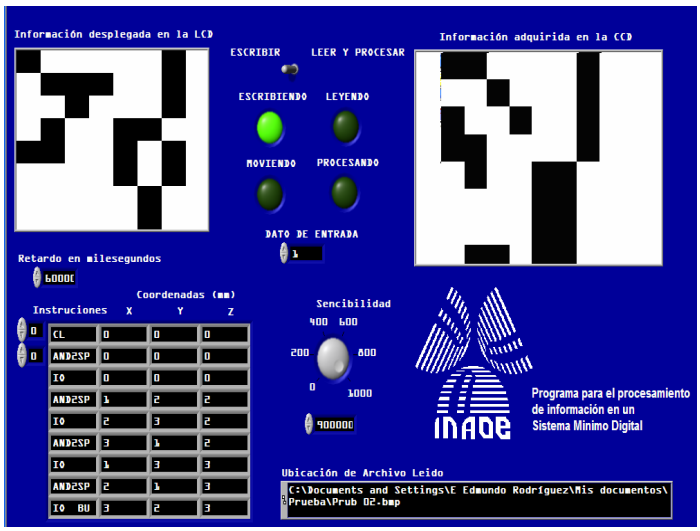


Figura 4.15 Diagrama de programación de la interfase gráfica.

Mediante este panel, el usuario puede controlar la posición del cristal introduciendo las coordenadas en X, Y y Z; la cuales se encuentran expresadas en milímetros. Este panel tiene también dos ventanas; una de las cuales despliega la misma información que se encuentra en la pantalla LCD y en la otra la información obtenida a través de la cámara CCD. Por lo que se puede cambiar la información desplegada en la pantalla y adquirir la imagen de salida con la cámara, al momento que el usuario lo desee. El panel de la Fig. 4.15 es el programa final que incluye en su interior el control de los motores, el control de la LCD y el control de la cámara CCD. Cada uno de estos programas fue realizado de forma independiente, pero para garantizar la funcionalidad y facilidad para cualquier operador se integraron en uno solo.

Para realizar una adecuada descripción del software se detallará individualmente cada una de las partes; comenzando por el programa que controla el sistema mecánico de posición en 3D, continuando con el programa que controla el grabado y lectura de hologramas.

4.5.1 Programa de control del sistema mecánico de posición

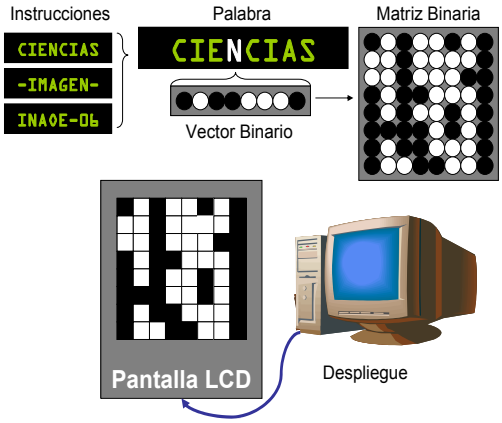
Teniendo la información a grabar desplegada en la LCD es necesario desplazar el cristal fotorrefractivo a otra posición, o bien mantenerla en dicha ubicación para el grabado o captura de la información según la disposición del usuario. Para tal propósito el usuario introduce en la etapa de control del sistema mecánico las coordenadas (Fig. 4.16), de las posiciones en donde se desea almacenar o de donde se desea recuperar la información. Como se ha mencionado anteriormente, esta etapa envía a través del puerto serial, una cadena de caracteres con la información de los giros y de los desplazamientos que se debe realizar por parte de los motores. Una vez que se realiza esta tarea, el microcontrolador responde con otra cadena de caracteres; que lleva la información de los desplazamientos realizados y su giro a la PC, de forma que se realice la retroalimentación del sistema. El software de control interpreta esta información, y si es semejante a la que él mismo envió; con esto se finaliza esta etapa, pero si no es así, nuevamente envía otra cadena con la información de los errores de desplazamiento, para que el circuito corrija la posición del cristal.

Fig. 4.16 Panel del programa del sistema mecánico de desplazamiento.

4.5.2 Lectura y grabado de hologramas

La primera tarea que realiza el software de control es la codificación de la información en forma de páginas binarias (esto debido a la aplicación de la memoria holográfica, la cual es descrita en el siguiente capítulo). Para realizar esta tarea el usuario introduce la información en el espacio destinado para la información a codificar (Fig. 4.17a). Una vez tecleada la información, el usuario corre el programa; para que de forma secuencial cada carácter de cada palabra escrita se transforme en un código binario de 8 bits. De manera que cada carácter se transforma en un vector binario y después (todos los vectores binarios) se multiplexan para que toda la palabra en cuestión se transforme en una matriz binaria. Esta matriz se multiplica para que se trasforme en una imagen binaria (píxeles blancos o negros) y sea desplegada en la pantalla LCD. La LCD despliega entonces la información a grabar en el cristal para posteriormente ser procesada por el sistema (Fig. 4.17b).

(a)

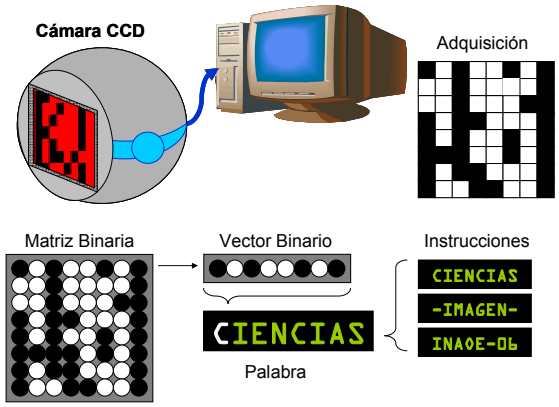


(b)

Figura 4.17 Programa para el despliegue de información a grabar: (a) Panel frontal del programa del despliegue de la información, y (b) Control de la LCD para el despliegue de información.

Cuando el usuario desea recuperar la información almacenada en el cristal, el sistema mecánico lleva o desplaza al cristal hasta la posición de donde se desea extraer la información solicitada. Una vez ubicado en esa posición, la cámara CCD adquiere la imagen de la información, pero esta imagen es el holograma de Fourier grabado previamente en el cristal (Fig. 4.18a). Como se menciona con anterioridad, esta imagen es adquirida como una matriz binaria de píxeles claros y oscuros. Posteriormente, es demultiplexada y se tiene de esta forma los caracteres introducidos como palabras en la parte de despliegue de información (Fig. 4.18b).

(a)



(b)

Figura 4.18 Programa de la adquisición de información: (a) Panel frontal del programa de captura de la información, y (b) Control de la CCD para la adquisición de información.

Una vez descritos todos los elementos que conforman a la memoria holográfica reconfigurable volumétrica, en el siguiente capítulo se describe su integración. Se presentan los resultados experimentales que comprueban su funcionamiento y desempeño.

REFERENCIAS

[4.1] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín “Memoria Holográfica Automática”, IEEE CD proceedings, Congreso Interuniversitario de Electrónica, Computación y Electricidad. Cd. Obregón, Sonora México, Marzo 2006.

[4.2] W. Goodman “Introduction to Fourier Optics”, McGraw Hill, Second edition, USA 2000.

[4.3] E. Rodríguez, H. Zúñiga, E. Tepichín “Codificación binaria de información para una memoria holográfica”, IEEE proceedings, Congreso Interuniversitario de Electrónica, Computación y Electricidad. Cd. Obregón, Sonora México, Marzo 2006.

[4.4] M. Ohira, Z. Chen, T. Kasamatsu, Crystal Growth LiNbO3:Fe and Its Photorefractive Properties, Applied Optics Vol. 30 No. 98, pp 2326-2329;1991

[4.5] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín, G. Ramírez, “Sistema óptico dinámico implementado para la formación de hologramas de Fourier en un cristal LinbO3:Fe. Congreso Nacional de física 2006; Sociedad Mexicana de física, SLP, México 2006.

[4.6] B. Krishna Das, Integrated Optical Distributed Bragg Reflector and Distributed Feedback Laser in Er:LiNbO3 Waveguides with Photorefractive Gratings, Doctoral Thesis; University of Paderborn, Department of Physics, Faculty of Science; 2003.

[4.7] P. Günter y J. P. Huignard, Fundamental Phenomena, Photorefractive Materials and Their Applications Vol. I (Springer Verlag 1988) pp 99 a 128.

[4.8] M. Ohira, Z. Chen, T. Kasamatsu, Crystal Growth LiNbO3:Fe and Its Photorefractive Properties, Applied Optics Vol. 30 No. 98, pp 2326-2329;1991

[4.9] X. Zhang, J. Xu, S. Liu, H. Huang, J. Wolfsberger, X. Chen, G. Zhang, Temporal evolution of beam fanning in LiNbO3:Fe,In crystals, Applied Optics Vol. 40 No. 5, pp 683-686, 2001.

[4.10] K. Buse, Some Properties of Lithium Niobate Crystals, Workshop of the Research Unit, Light Confinement and Control with Structured Dielectrics and Material (Physical Institute, University of Bonn).

[4.11] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín "Memoria Holográfica Reconfigurable", 3er. Encuentro Mujer en la Investigación Científica, León Guanajuato México, Abril 2006.

[4.12] E. Bautista, E. Tepichín, P. Rodríguez, Técnicas ópticas para la identificación del eje C cristalográfico en materiales fotorrefractivos; Congreso Nacional de Física 1997; Sociedad Mexicana de Física, México. 1997.

[4.13] EAD Motors®, Manual de operación, ZB17EBK series, www.eadmotors.com.

CAPÍTULO 5

MEMORIA HOLOGRÁFICA VOLUMÉTRICA RECONFIGURABLE: INTEGRACIÓN DEL SISTEMA OPTO-ELECTRÓNICO

5.1 Introducción

En el capítulo anterior se describieron las partes que constituyen a la memoria holográfica volumétrica reconfigurable. El objetivo de este capítulo es integrar a la memoria holográfica. Es decir, explicar el funcionamiento en conjunto y demostrar qué tan satisfactorio es el funcionamiento de la memoria holográfica volumétrica reconfigurable.

5.2 Integración

El diagrama de la Fig. 5.1 ilustra el bosquejo total de la memoria holográfica volumétrica. Observe que la información se despliega en la LCD para almacenarse en forma de hologramas de Fourier en el cristal fotorrefractivo y posteriormente ser recuperados por la cámara CCD.

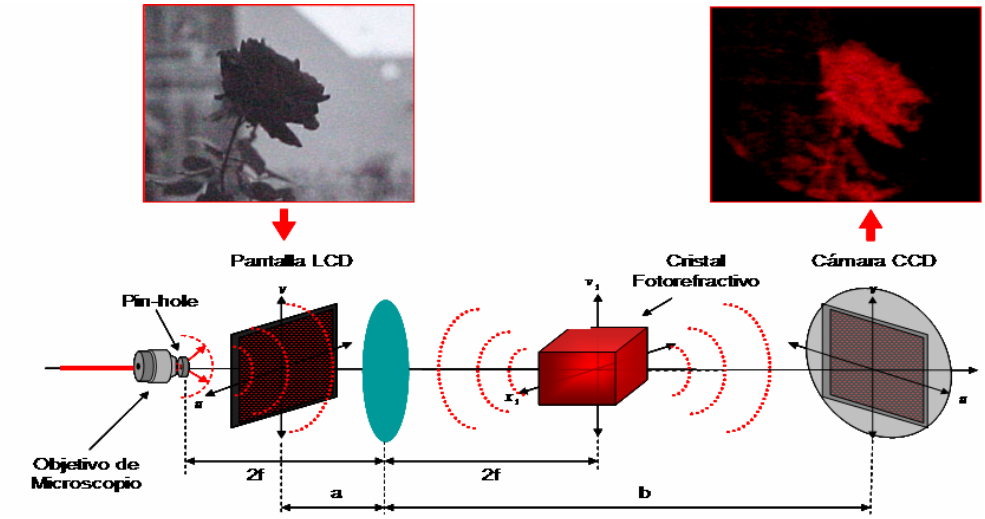


Figura 5.1 Memoria Holográfica Volumétrica

De forma general, la memoria holográfica realiza la secuencia ilustrada en la Fig 5.2.

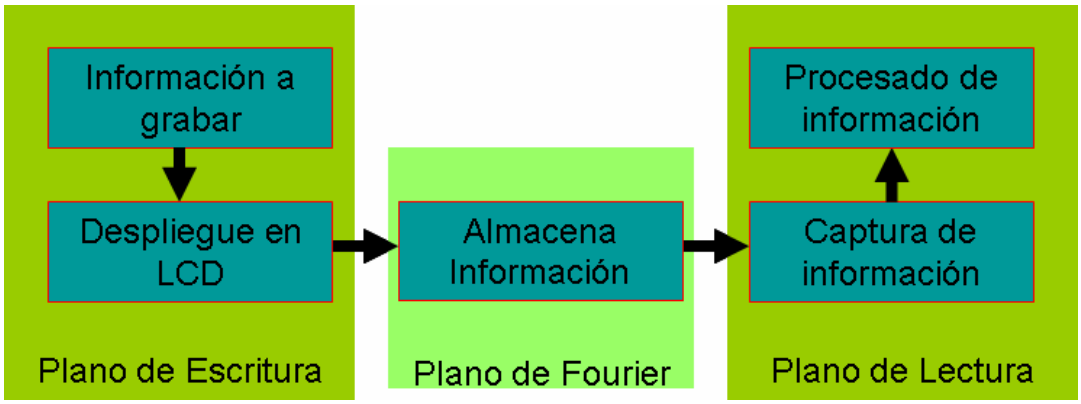
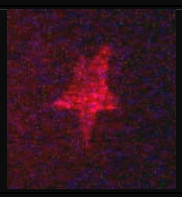
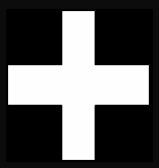
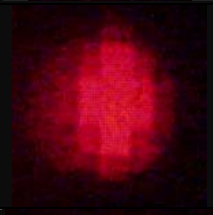
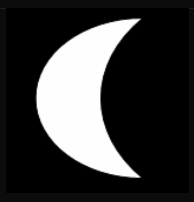
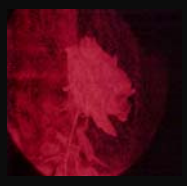
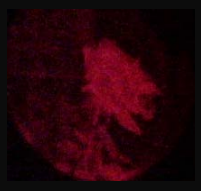


Figura 5.2 Secuencia de funcionamiento de la Memoria Holográfica Volumétrica Reconfigurable

Observe que la secuencia de trabajo de la memoria holográfica es muy simple, debe desplegar la información a grabar a través de la LCD, almacenarla en forma de holograma de Fourier y posteriormente capturar la información en el plano de lectura mediante la CCD [5.1]. La tabla 5.1

muestra los hologramas grabados para comprobar el funcionamiento de la memoria holográfica.

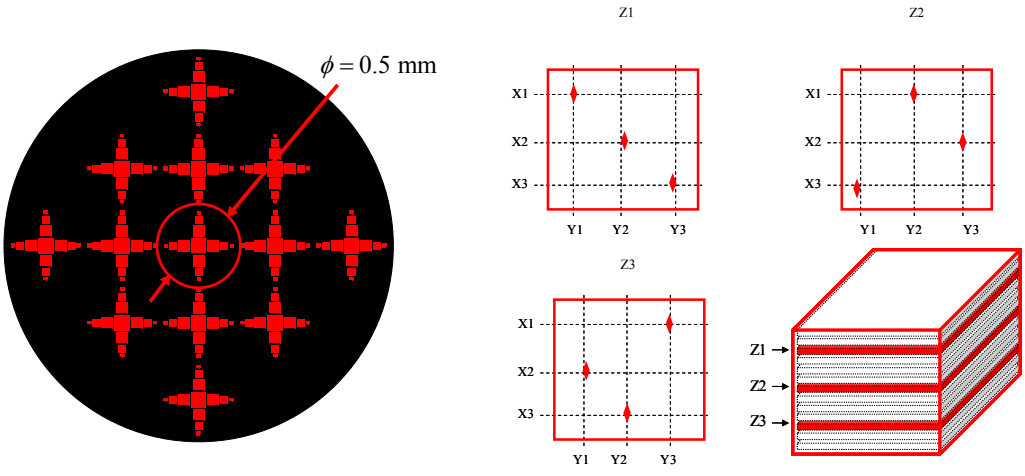
Tabla 5.1 Hologramas grabados en la memoria holográfica volumétrica reconfigurable

Objeto	Dirección	Imagen	Holograma
	X1, Y1, Z1		
	X2, Y2, Z1		
	X1, Y2, Z2		
	X2, Y1, Z2		

Al grabar estos hologramas se encontró que la velocidad de registro es un tanto limitada como resultado de la longitud de onda con la cual se graban y recuperan los hologramas. Es importante hacer distinción entre las velocidades de registro y de acceso. Experimentalmente, esta última resulta ser de 0.5 s, y está limitada por el sistema mecánico de posicionamiento.

Si se hace una comparación con el sistema óptico tradicionalmente utilizado para grabar hologramas en un cristal fotorrefractivo, se observa que al eliminar de nuestro sistema óptico dos dispositivos como lo son las lentes, la estabilidad mecánica aumenta considerablemente; ya que estos dispositivos tienen la desventaja de desalinearse con vibraciones de alta frecuencia, que no pueden ser compensadas por las mesas estabilizadoras.

El desplazamiento mínimo necesario para evitar interferencia entre los hologramas grabados es mostrado en la Fig. 5.3a. Para tener una eficiencia de difracción alta [5.3-5.9], el ángulo entre los haces de referencia y objeto es igual al ángulo de Bragg del cristal, que en este caso es de 13º (Fig. 5.3b). Considerando la distribución espacial de estos hologramas en el cristal y el ángulo de Bragg es posible almacenar en nuestro prototipo hasta 182 hologramas. Considerando que el único método de multiplexado por ahora es el desplazamiento. En caso de considerar algún otro (como el caso del multiplexado angular), este número se incrementaría considerablemente.



(a) (b)

Figura 5.3 Hologramas almacenados en la memoria: (a) Patrón de difracción de los hologramas almacenados, y (b) Distribución espacial de los hologramas almacenados en el cristal fotorrefractivo.

Debido a una aplicación posterior de la memoria holográfica, como una memoria EEPROM (Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory por sus siglas en inglés), se modificó la secuencia original de la memoria para realizar ahora esta nueva aplicación. De forma que ahora la información almacenada en el cristal se grabará en forma de páginas binarias de información, como se observa en la Fig. 5.4. Para comprobar el funcionamiento de la memoria holográfica en esta aplicación, se grabaron en el cristal fotorrefractivo 10 hologramas de Fourier de páginas binarias. La Tabla 5.2 muestra un solo holograma y pretende ilustrar el periodo de permanencia de grabado del holograma.

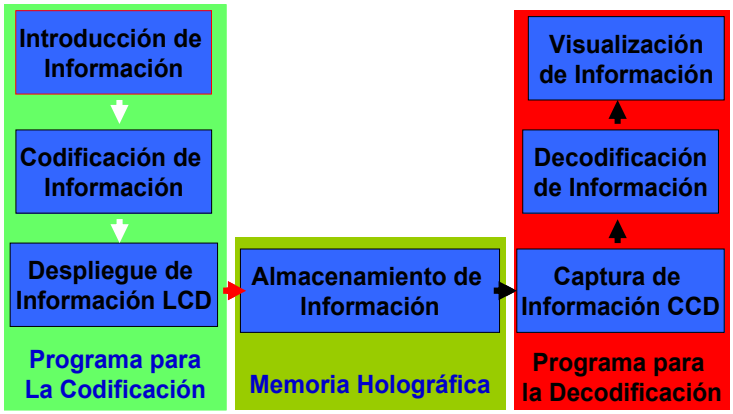


Figura 5.4 Secuencia de funcionamiento de la memoria holográfica como memoria EEPROM.

Tabla 5.2 Hologramas de Fourier grabados en el cristal fotorrefractivo.

6 hrs.	24 hrs.	52 hrs.

A continuación, otros hologramas serán analizados y descritos, a fin de mostrar el efecto del tiempo en la calidad de las imágenes obtenidas de los hologramas; y cómo ésta afecta en la codificación y decodificación de éstos.

5.3 Resultados

Para comprobar el funcionamiento de la memoria holográfica como memoria EEPROM, se grabaron en el cristal fotorrefractivo 10 hologramas de Fourier de páginas binarias, es decir, se grabó información en forma de mapas de píxeles blancos y oscuros, los que se ilustran Tabla 5.3. La decisión de grabar solo diez hologramas es para comprobar que el prototipo cumple con lo requerido por los objetivos.

La descripción física de los elementos empleados en el sistema se ilustra en la tabla 5.4, donde se puede observar la potencia del láser, el tiempo de lectura y escritura, entre otras.

Existen algunos errores al momento de procesar la información en el sistema, como lo son los de tipo mecánico. En este caso, existe una variación en la repetibilidad del sistema de posición, ocasionando que se tenga un ligero desplazamiento en la adquisición de la imagen. Otro tipo de error existente en el sistema, es debido al desenfoque de la cámara que captura la información, esto ocasiona que existan más de dos bits de error por cada vector binario del mapa de píxeles blancos y oscuros.

En la práctica, la limitación en la velocidad de registro del sistema depende directamente de la intensidad del haz luminoso; en este caso, se utilizó como fuente de luz un láser rojo ($\lambda = 632.8nm$, 25mW), de baja potencia; por lo que la velocidad de registro es considerada regular en comparación a con la de las memoria de semiconductores.

Tabla 5.3 Hologramas grabados en el cristal fotorrefractivo

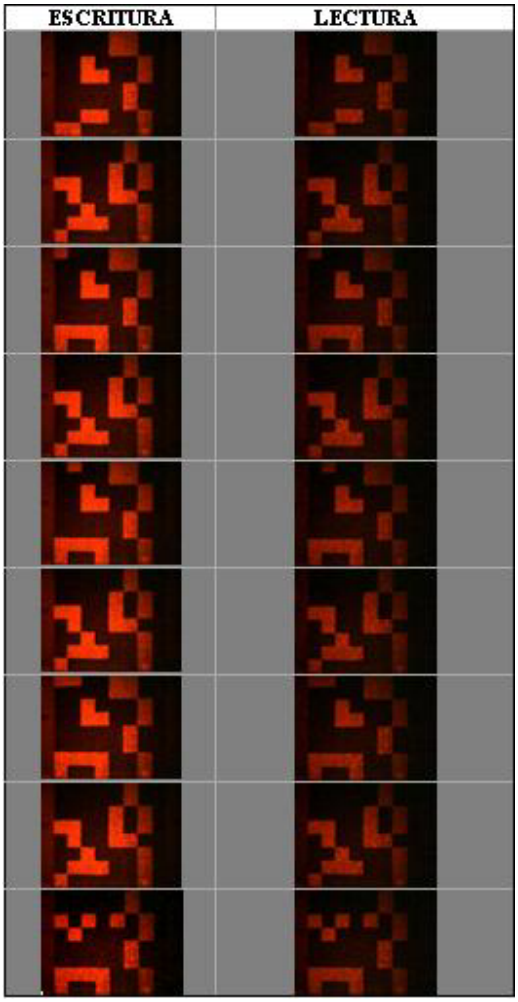


Tabla 5.4 Características físicas de los elementos del sistema

CARACTERÍSTICAS		
POTENCIA LÁSER		25 mW
TIEMPO REGISTRO		900 s
VELOCIDAD MECÁNICA	EJES X e Y	2 s / mm
	EJE Z	0.7 s / mm
TIEMPO DE PROCESADO INFORMACION		0.025 s

REFERENCIAS

[5.1] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín, Memoria Holográfica Automática, IEEE proceedings; CIECE, CITEE. Cd. Obregón, Sonora.

[5.2] E. Bautista, E. Tepichín, P. Rodríguez; Técnicas ópticas para la identificación del eje C cristalográfico en materiales fotorrefractivos, Congreso Nacional de Física 1997; Sociedad Mexicana de Física, México. 1997.

[5.3] H. Zúñiga, E. Rodríguez, E. Tepichín, G. Ramírez; Sistema óptico dinámico implementado para la formación de hologramas de Fourier en un cristal LinbO3:Fe, Congreso Nacional de física 2006; Sociedad Mexicana de física, SLP, México 2006.

[5.4] H. Zúñiga, Rodríguez E., Castro A., Tepichin E.; Memoria Holográfica reconfigurable con una lente; 3tro de la participación de la mujer en la ciencia, CIO, Gto., México 2006.

[5.5] B. Krishna Das, Integrated Optical Distributed Bragg Reflector and Distributed Feedback Laser in Er:LiNbO3 Waveguides with Photorefractive Gratings**,** Doctoral Thesis; University of Paderborn, Department of Physics, Faculty of Science; 2003.

[5.6] P. Günter y J. P. Huignard, Fundamental Phenomena, Photorefractive Materials and Their Applications Vol. 1, 1988.

[5.7] M. Ohira, Z. Chen, T. Kasamatsu, Crystal Growth LiNbO3:Fe and Its Photorefractive Properties, Applied Optics Vol. 30 No. 98, 1991.

[5.8] X. Zhang, J. Xu, S. Liu, H. Huang, J. Wolfsberger, X. Chen, G. Zhang, Temporal evolution of beam fanning in LiNbO3:Fe in crystals, Applied Optics Vol. 40 No. 5, 2001.

[5.9] K. Buse, Some Properties of Lithium Niobate Crystals, Workshop of the Research Unit, Light Confinement and Control with Structured Dielectrics and Material (Physical Institute, University of Bonn).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

Se comprobó de manera práctica el funcionamiento del sistema opto-electrónico implementado para la automatización del proceso de grabación, lectura y multiplexado espacial de la información almacenada en un cristal fotorrefractivo. La innovación de la propuesta es la modificación del sistema óptico de una sola lente para el grabado de información en hologramas de volumen tipo Fourier.

Los resultados experimentales demuestran que el sistema opto-electrónico es capaz de reproducir y ubicar espacialmente los diferentes hologramas grabados en el medio de registro, que en este caso es el cristal fotorrefractivo $LinbO_3$:Fe. Además, al utilizar este tipo de medio de grabado, se cumple con el objetivo de la memoria reconfigurable.

Se realizó la automatización el sistema opto-electrónico a fin de realizar todo el proceso de grabado y lectura de manera dinámica, cumpliendo con el propósito de diseñar e implementar las partes necesarias para tal objetivo, como lo es el hardware de la memoria holográfica volumétrica reconfigurable.

Los resultados obtenidos demuestran que la memoria holográfica volumétrica reconfigurable funciona adecuadamente, lo que corrobora nuestra propuesta.

6.2 Trabajo a futuro

Existen diversas aplicaciones que se le pueden dar a la memoria holográfica. Podría utilizarse, por ejemplo, como una emulación de una memoria EEPROM, para compuertas ópticas lógicas, o bien, modificar su sistema para sustituir la PC utilizada por un sistema más simple, como un microcontrolador. De hecho, parte de los resultados ilustrados en la tesis muestran que es posible utilizar la memoria holográfica volumétrica reconfigurable como un elemento externo para grabar y recuperar información codificada. La limitante aquí es el tiempo de permanencia de los datos, la cual podría solucionarse mediante un método de fijado térmico.

PUBLICACIONES

1. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, A. Castro, D. Sánchez de la Llave, E. Tepichín Rodríguez
   Minimum digital system, emulated by a reconfigurable single-lens holographic memory
   Optics and Photonics,
   Proc. SPIE Vol. 6314 p402, 63141N (2006).

2. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, E. Tepichín Rodríguez
   Automatic system for a holographic memory
   International Conference on Dynamics Instrumentation and Control CDIC´06
   IEEE & CONCYTEQ, IEEE proceedings, Querétaro, México (2006).

3. H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, E. Tepichín Rodríguez
   Memoria holográfica reconfigurable dinámica
   XX Congreso Ínteruniversitario de Electrónica, Computación y Eléctrica, CIECE
   IEEE México & ITSON, IEEE CD proceedings, México (2006).

4. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, E. Tepichín Rodríguez
   Codificación binaria de información para una memoria holográfica
   XX Congreso Ìnteruniversitario de Electrónica, Computación y Eléctrica, CIECE
   IEEE México & ITSON, IEEE CD proceedings, México (2006)**.**

Resúmenes en congreso

5. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, A. Castro, D. Sánchez de la Llave, E. Tepichín Rodríguez
Minimum digital system, emulated by a reconfigurable single-lens holographic memory
Optics and Photonics, Proc. SPIE Vol. 6314 p402, 63141N (2006).

6. H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, G. Ramírez Zavaleta, E. Tepichín Rodríguez
Sistema óptico dinámico implementado para la formación de hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de LiNbO3:Fe
XLIX Congreso Nacional de Física, XIX Reunión Anual de Óptica SMF-DO & AMO, San Luís Potosí, SLP, México (2006).

7. H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, G. Ramírez Zavaleta, E. Tepichín Rodríguez
Memoria holográfica dinámica, implementada como dispositivo de almacenamiento de información en un sistema mínimo
XLIX Congreso Nacional de Física, XIX Reunión Anual de Óptica SMF-DO & AMO, San Luís Potosí, SLP, México (2006).

8. H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, E. Tepichín Rodríguez
Memoria holográfica reconfigurable de una lente
3er Encuentro “Participación de la Mujer en la Ciencia”
CIO & CIATEC, Guanajuato, México (2006).

9. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, E. Tepichín Rodríguez
Implementación de una memoria holográfica reconfigurable en un sistema mínimo digital
3er Encuentro “Participación de la Mujer en la Ciencia”
CIO & CIATEC, Guanajuato, México (2006).

Presentaciones en congresos nacionales e internacionales

10. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, A. Castro, D. Sánchez de la Llave, E. Tepichín Rodríguez
Minimum digital system, emulated by a reconfigurable single-lens holographic memory
Optics and Photonics,
Proc. SPIE Vol. 6314 p402, 63141N (2006).

11. E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, E. Tepichín Rodríguez
Automatic system for a holographic memory
International Conference on Dynamics Instrumentation and Control CDINC´06
IEEE & CONCYTEQ, IEEE proceedings, Querétaro, México (2006).

12. H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, G. Ramírez Zavaleta, E. Tepichín Rodríguez
Sistema óptico dinámico implementado para la formación de hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de LiNbO3:Fe
XLIX Congreso Nacional de Física, XIX Reunión Anual de Óptica
SMF-DO & AMO, San Luís Potosí, SLP, México (2006).

13. H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, G. Ramírez Zavaleta, E. Tepichín Rodríguez
Memoria holográfica dinámica, implementada como dispositivo de almacenamiento de información en un sistema mínimo
XLIX Congreso Nacional de Física, XIX Reunión Anual de Óptica
SMF-DO & AMO, San Luís Potosí, SLP, México (2006).

APÉNDICE A

ELEMENTOS DE CONTROL

A.1 Introducción

Como elementos de control se conocen a todos aquellos dispositivos que de una manera u otra están sujetos a realizar una tarea o acción siempre que reciban una señal de ejecución o de mando. Se conocen como elementos de control a motores, actuadores en general, dispositivos de salida, etc. Como parte del desarrollo de la tesis, se incluye el diseño y construcción de una tarjeta electrónica para manipular correctamente la montura mecánica de posición. Por ello, en este capítulo se analizarán los elementos de control utilizados para tal objetivo. Además de describir los elementos anteriormente mencionados, al final del capítulo se mencionará un poco la interfase gráfica aplicada para el procesado de los hologramas, en este punto se hace referencia a LabVIEW®.

A.2 Motores

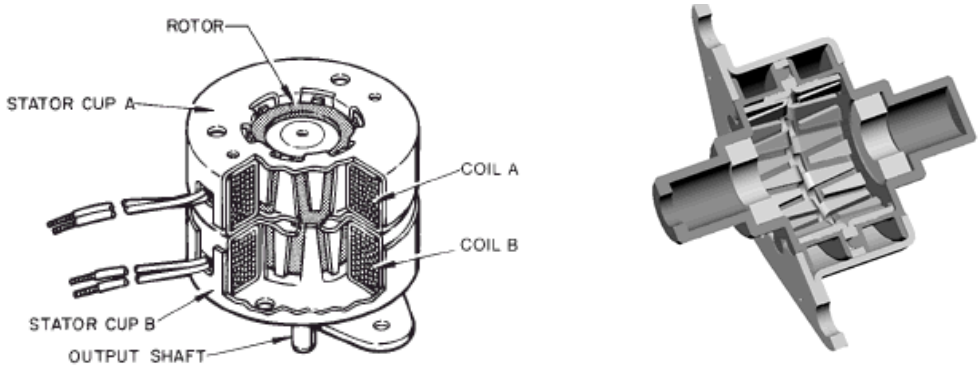
Una de las clasificaciones más comunes en términos de motores es considerar a todos estos en dos grandes grupos; los de combustión interna y los eléctricos. Los motores eléctricos pueden definirse como una máquina eléctrica rotativa que transforma energía eléctrica en energía mecánica. Una de las ventajas más conocidas es su menor tamaño y peso comparado con otro tipo de motores.

La conversión de energía en un motor eléctrico se debe a la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético. Un campo magnético, que se forma entre los dos polos opuestos de un imán, es una

región donde se ejerce una fuerza sobre cargas en movimiento. Un motor eléctrico aprovecha este tipo de fuerza para hacer girar un eje, transformándose así la energía eléctrica en movimiento mecánico. Los dos componentes básicos de todo motor eléctrico son el rotor y el estator. El rotor es una pieza giratoria, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado por el que pasa la corriente eléctrica. El estator, situado alrededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente.

A.2.1 Motores de pasos

Un tipo de motor eléctrico que entra en esta categoría es el *motor paso a paso (PaP)* o *step motor* (por sus siglas en inglés). El motor PaP es un dispositivo que produce una rotación en ángulos iguales, denominados pasos, por cada pulso digital que llegue a su entrada. [A.1, A.2]. Un motor PaP básicamente se constituye de un estator y un rotor (Fig. A.1). El estator es la parte fija construida a base de cavidades en las que se ubican las bobinas. El rotor, es la parte móvil que girará libremente y está construida mediante un imán permanente.



a) Corte transversal b) Isométrico

Figura A.1 Estator y Rotor de un motor PaP

Un motor PaP es utilizado comúnmente en la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos precisos, siendo su característica principal el control del desplazamiento del rotor en función de la tensión aplicada a las bobinas.

Existen diversos tipos de motor PaP [A.2]:

1. *Motor paso a paso de reluctancia variable:* En este caso el rotor es de acero dulce, cilíndrico y tiene cuatro polos, menos polos que en el estator. Cuando llega corriente eléctrica a un par de devanados opuestos, se produce un campo magnético cuyas líneas de fuerza pasan de los polos del estator a través del grupo de polos más cercano al rotor.
2. *Motor paso a paso de imán permanente*: Este tipo de motor tiene un estator con cuatro polos. El rotor es un imán permanente, por lo que al conectar una corriente eléctrica a uno de los pares de polos del estator, el rotor se desplaza hasta alinearse con él.

Algunas de las características eléctricas y especificaciones a considerar cuando se eligen motores de pasos son las enlistadas a continuación (Tabla A.1):

Tabla A.1 Características eléctricas de motores PaP

Característica del motor	**Descripción**
Par dinámico de trabajo	Es el momento máximo sin que el motor pierda pasos, a pesar de la carga.
Ángulo de paso	Se trata del ángulo que gira el motor durante un cambio de estado en los devanados del estator. Se

	mide en grados.
Número de pasos por vuelta	Es la cantidad de pasos que realiza el rotor para ejecutar una revolución completa.
Fase	Se refiere a la cantidad de devanados independientes del estator
Par de retención	Es el máximo par que se puede aplicar a un motor energizado sin modificar suposición de reposo y provocar la rotación del eje.

Una forma diferente de diferenciar los motores PaP, es debido al número de cables, los unipolares (cuatro bobinas) y los de tipo bipolares (dos bobinas) [A.3]. Pero sin duda, la diferencia más grande entre éstos, es la forma de circulación de la corriente eléctrica entre sus bobinas.

Para manejar un motor PaP unipolar es necesario aplicar tensión eléctrica en alguna de sus bobinas de forma que el motor avance, sin ser necesaria ninguna inversión de corriente eléctrica, de forma que el motor avanza un paso por vez, comenzando por el paso 1 una vez que se haya alcanzado el paso final (Fig. A.2). Existen tres diversas formas de realizar el desplazamiento del motor unipolar, estas son [A.4]:

- **Paso Simple:** Consiste en activar cada bobina una a una de forma independiente. La desventaja es la poca fuerza de arranque.
- ***Paso doble:*** *S*e activan las bobinas de dos en dos, obteniéndose un campo magnético potente que atraerá con más fuerza y retendrá el rotor del motor en el sitio.

- ***Medios Pasos:*** Si se combinan las secuencias anteriores, es posible mover al motor en pasos mas pequeños y precisos; de forma que el recorrido final de los 360º del motor sean en el doble de pasos de movimiento.

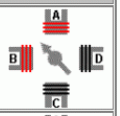
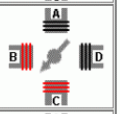
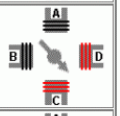
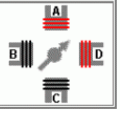
PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

Figura A.2 Secuencia para motor PaP Unipolar

En el caso del motor PaP bipolar cada inversión de la polaridad implica el movimiento en un paso, en donde el sentido de giro estará determinado por la secuencia seguida. Para esta inversión de polaridad generalmente se utilizan dispositivos electrónicos que proporcionen la corriente necesaria, como es el caso de los puentes H.

Como se mencionó anteriormente, en los motores bipolares el sentido de giro depende directamente de la secuencia de pulsos aplicada a las bobinas, un ejemplo de tal secuencia sería la ilustrada en la tabla A.2.

Tabla A.2 Secuencia de un motor bipolar

PASO	TERMINALES			
	A	***B***	***C***	***D***
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

En la Tabla A.2 se observa que cada inversión en la polaridad provoca el movimiento del eje; la dirección de giro esta en correspondencia directa con la dirección de la secuencia de pasos, por ejemplo, para avanzar en el sentido horario la secuencia seria 1-2-3-4-1-2-3-4…, mientras que para el sentido anti-horario seria 4-3-2-1,-4-3-2-1...

A.3 Microcontroladores

Antes de la invención de los microprocesadores los diseños electrónicos significaban una amplia circuitería provocando sistemas grandes y complejos. Era la era de los controladores simples, dispositivos que se empleaban para realizar uno o varios procesos. Hace poco más de tres décadas los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta. Para 1980 aparece el primer microprocesador [3.4], originando que los diseños electrónicos fueran mucho más pequeños y simplificados. Estos microprocesadores incluían circuitos externos de memoria y periféricos de E/S. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de *microcontrolador*. Un microcontrolador incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador, CPU, memoria y unidades de E/S. Siendo su

característica principal el alto nivel de especialización. A diferencia del CPU, el microcontrolador puede funcionar como un ordenador en funcionamiento con un mínimo de circuitería externa, además del reducido espacio que ocupa (Fig. A.3).

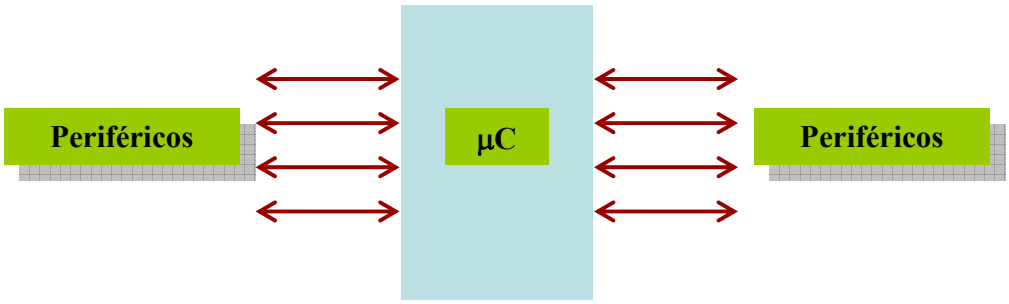


Figura A.3 Esquema de un Microcontrolador

Existe una gran diversidad de microcontroladores. Quizá la clasificación más importante sea entre microcontroladores de 3, 8, 16 ó 32 bits. Existen muchas empresas que se dedican a la fabricación de microcontroladores, como son por ejemplo, Amtel®, Hitachi®, Intel®, Motorola®, Microchip®, entre otras. Debido al tipo de aplicación utilizada, nos centraremos en los fabricados por Microchip® de la gama media.

A.3.1 Familia PIC Microchip®

El fabricante Microchip® dispone de cuatro familias de microcontroladores de 8 bits. Los microcontroladores PIC16F877 de Microchip son de 40 pines, cuentan con 5 canales de conversión analógica/digital, capacidad en memoria ROM de 8192, capacidad en memoria RAM de y 367, con 22 líneas de entradas/salidas. Todos los microcontroladores PIC poseen arquitectura Harvard, en ésta es independiente la memoria de instrucciones de la memoria de datos,

disponiendo cada una de su propio sistema de buses para el acceso (paralelismo).

Los bloques principales de estos microcontroladores son:

Unidad Central de Procesos (CPU): Direcciona la memoria de instrucciones, codifica y ejecuta la instrucción.

Memoria: De tipo FLASH para almacenar las instrucciones del programa de control; y de tipo RAM para la memoria de datos.

Temporizadores: Pueden ser programados para llevar la cuenta de acontecimientos externos o bien para controlar periodos de tiempo.

Convertidores Analógico/Digital: Establecen una relación entre el valor de la señal en su entrada y la palabra digital obtenida en su salida.

A.4 Puentes H

Para controlar una carga inductiva, como lo es un motor de pasos, por medio de un microcontrolador es necesario utilizar un *driver* o *excitador*; esto para separar la señal enviada por el microcontrolador de la etapa de potencia. En caso de no realizar esta separación el microcontrolador sufriría un daño irreversible. Uno de los drivers simples y prácticos es el ***Puente H***. El puente H permite un funcionamiento ON-OFF del motor, a plena potencia en un sentido o en el otro. El nombre proviene de su configuración en H de los transistores en que consiste (Fig. A.4a).

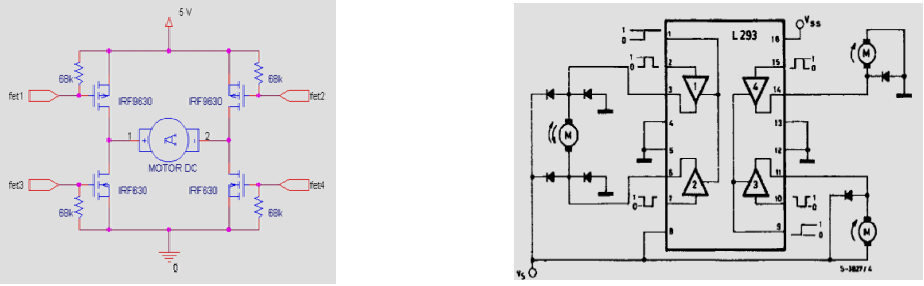


Figura A.4 Puente H: (a) Configuración basada en transistores, y (b) Dispositivo comercial L293

Comercialmente, existen dispositivos que en su interior se componen de arreglos de puentes H, uno de estos es el L293B (Fig. A.4b). El circuito L293B es un driver que contiene 4 puentes H en su interior, con capacidad para entregar corrientes de salida de 1A por cada uno [A.5].

A.5 LabVIEW® como interfase gráfica

LabVIEW® es una herramienta gráfica con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones, diseño y presentaciones de datos mediante la programación [A.6]. Fue desarrollado por National Instruments para proporcionar la flexibilidad de un ambiente de programación sin la complejidad de los ambientes tradicionales. Trabaja con poco más de 1000 librerías de instrumentos de cientos de fabricantes permitiendo integrarse con casi cualquier tipo de hardware. Es fácil de aplicar en interfaces de comunicaciones como el puerto serie, paralelo, USB, TCP/IP, GPIB, etc.

REFERENCIAS

[A.1] W. Bolton, Mecatrónica, 3era. Edición; Ed. Alfaomega.

[A.2] Enrique Sanchíz, Sistemas electrónicos digitales: Fundamentos y diseño de aplicaciones; Publ. Universidad de valencia; 2002.

[A.3] Enriquez Harper, Fundamentos de control de motores eléctricos en la industria; Ed Limusa, 1999.

[A.4] J.M. Angulo Usategui, I. Angulo Martínez, Microcontroladore PIC. Diseño y aplicaciones;Ed. McGraw Hill, 3era Edición.

[A.5] Robert Boylestand, Electrónica. Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos; Ed. Pearson; 8va Edición.

[A.6] J. Conway, S. Watts S, A software engineering approach to LabVIEW; Ed. Prentice Hall; 2003.