



INAOE

"MEMORIA HOLOGRÁFICA DINÁMICA"

Por:

Marcos Antonio Plata Sánchez

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.

Supervisada por:

Dr. Eduardo tepichín Rodríguez
M. C. Edwin Mejia Motta

(INAOE)
(INAOE)

Tonantzintla, Puebla.

Octubre de 1999.



RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se presenta el prototipo de un sistema híbrido (óptico-electrónico), basado en un cristal fotorrefractivo que permite llevar a cabo el proceso de grabado, lectura y borrado de información holográfica en forma dinámica, teniendo como resultado una memoria holográfica reutilizable. Esta memoria holográfica consta básicamente de dos partes. La primera consiste en un sistema óptico basado en una arquitectura de una sola lente que permite grabar, reconstruir y borrar imágenes en un cristal fotorrefractivo sin necesidad de más elementos ópticos. La segunda parte del sistema consiste en el diseño y construcción de un sistema electrónico de posicionamiento.

El cristal fotorrefractivo es colocado en el dispositivo electrónico de posicionamiento para poder realizar la localización de los puntos en los que se graba la información sobre una de sus caras. Este proceso de localización es realizado de una manera rápida y precisa y es controlado por medio de una computadora. El proceso de localización de los puntos es realizado por medio de un programa con el que generan señales de control y que son sacadas a través del puerto paralelo de la PC. Estas señales de control van directamente a un Dispositivo Lógico Programable (PLD), el cual genera secuencias de movimiento para dos motores de paso los cuales pueden ser acoplados directamente a una montura mecánica de precisión.

El dispositivo diseñado es capaz de localizar 16 millones de puntos en un centímetro cuadrado. En este trabajo solamente nos interesa tener control sobre la localización de nueve puntos diferentes en la misma área.

Se presentan resultados experimentales que comprueban el buen desempeño de nuestro sistema.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de una manera muy especial al Dr. Eduardo Tepichín R., por haber sugerido y dirigido esta tesis. Por todo el apoyo y la paciencia brindados durante el desarrollo de la misma, ya que sin sus consejos y dirección no hubiese sido posible su culminación.

Al M.C. Edwin Mejia Motta por la dirección de la parte de electrónica diseñada e implementada en este trabajo, así como por las correcciones y comentarios relacionados con el mismo.

Al Instituto Nacional de Astrofísica Optica y Electrónica (INAOE), así como a todo el personal docente, administrativo y de servicios que hacen posible el buen funcionamiento de la institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ya que sin el apoyo económico recibido en forma de beca durante mi estancia en el INAOE, no hubiese sido posible realizar mis estudios de Maestría.

A Gustavo Ramírez Zavaleta por haber realizado el acoplamiento de los motores de paso a la montura de desplazamiento.

A Jorge Ibarra por sus consejos y su opinión acerca de los resultados que se iban obteniendo en el laboratorio, lo cuál me permitió mejorarlos.

A todos los profesores e investigadores del INAOE, de los que he recibido la formación necesaria para culminar con éxito mis estudios de Maestría.

A mi tío, el Lic. Sergio Sánchez Martínez por haberme ayudado en la parte de la programación, así como por todos sus consejos y su ayuda siempre incondicional.

A mi familia por su confianza y apoyo durante mis estudios, por estarme dando siempre y en todo momento palabras de aliento.

A todos mis amigos y compañeros que de alguna manera estuvieron conmigo durante todo el desarrollo de este trabajo, gracias por su amistad.

DEDICADA

A mi madre :

Sra. María de los Remedios Sánchez Martínez

*Mamá, muchas gracias por tu paciencia y comprensión, por la confianza
que siempre has depositado en mí.*

INDICE

CAPITULO 1

INTRODUCCION	1
--------------	---

CAPITULO 2

HOLOGRAFIA

2.1 INTRODUCCION	7
2.2 ILUSTRACION GRAFICA DEL PRINCIPIO DE HOLOGRAFIA	8
2.3 DESCRIPCION MATEMATICA DEL PRINCIPIO DE HOLOGRAFIA	10
2.4 HOLOGRAMAS PLANOS Y DE VOLUMEN	18

CAPITULO 3

PROCESO DE GRABADO EN UN MATERIAL FOTORREFRACTIVO

3.1 INTRODUCCION	21
3.2 MATERIALES FOTORREFRACTIVOS	22
3.3 TEORIA SIMPLIFICADA DE FOTORREFRACTIVIDAD	23
3.4 DETECCION DE UN PATRON ESPACIAL SENOIDAL DE INTENSIDAD	26

CAPITULO 4

DESCRIPCION DEL SISTEMA OPTICO PROPUESTO

4.1 INTRODUCCION	29
4.2 DESCRIPCION DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA PROPUESTO	30

CAPITULO 5

DISPOSITIVO ELECTRONICO DE POSICIONAMIENTO

5.1 INTRODUCCION	34
5.2 DIAGRAMA GENERAL A BLOQUES DEL DISPOSITIVO	36

5.3	PROCESO DE GRABACION DEL PLD	37
5.3.1	DIAGRAMA A BLOQUES	37
5.3.2	DIAGRAMA DE ESTADOS	38
5.3.3	TABLA DE ESTADOS	40
5.4	GENERACION DE LAS SEÑALES DE CONTROL	41
5.5	ACOPLAMIENTO DEL PLD A LAS ETAPAS DE POTENCIA	41
5.6	ACOPLAMIENTO A LA MONTURA DE DESPLAZAMIENTO	42
6.7	CARACTERISTICAS GENERALES DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	44

CAPITULO 6

RESULTADOS

6.1	INTRODUCCION	48
6.2	SISTEMA OPTICO COMPLETO	49

CAPITULO 7

CONCLUSIONES	58
--------------	----

LISTA DE FIGURAS	60
------------------	----

REFERENCIAS	62
-------------	----

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La tecnología de la fotografía ha estado con nosotros durante un largo tiempo y hemos crecido acostumbrados a ver el mundo tridimensional comprimido en la planicidad de la página de un libro. El animador de TV, sin profundidad, que sonríe entre una miríada de luces fosforescentes aunque ineludiblemente está ahí, no parece más palpable que una imagen de una tarjeta postal de la Torre Eiffel. Ambos comparten la severa limitación de ser sólo variaciones de la irradiancia. En otras palabras, cuando la imagen de una escena se reproduce ordinariamente por cualquier medio tradicional, ésta finalmente no es una reproducción precisa del campo luminoso que inundaba al objeto, sino más bien un registro punto a punto de sólo el cuadrado de la amplitud del campo. La luz que se refleja en una fotografía lleva con ella información acerca de la irradiancia pero ninguna acerca de la fase de la onda que emanaba del objeto. En efecto, si tanto la amplitud como la fase de la onda original se pudieran reconstruir de alguna manera, el campo de luz resultante (suponiendo que las frecuencias fueran las mismas) no se distinguiría del original. Esto significa, que entonces, veríamos (y podríamos fotografiar) la imagen formada en una tridimensionalidad perfecta exactamente como si el objeto estuviera ante nosotros, generando en realidad la onda.

Dennis Gabor había estado pensando en este sentido por varios años antes de 1947 cuando comenzó sus ahora famosos experimentos en holografía en el Research Laboratory de la British Thompson-Houston Company. Su montaje original, era un proceso de formación de imágenes sin lentes, de dos pasos, en el que primero registraba fotográficamente un patrón de interferencia, generado por la interacción de luz cuasimonocromática esparcida por un objeto y una onda de referencia coherente. El patrón resultante era algo que él llamaba un *holograma*, de la palabra griega *holos* que significa completo. El segundo paso en el procedimiento era la reconstrucción del campo óptico o imagen y esto se hacía mediante la difracción de un haz coherente por una transparencia, que era el holograma revelado. En una forma muy reminiscente de la técnica de contraste de fase de Zernike^[1.1], el holograma se formaba cuando el fondo no esparcido u onda de referencia interfería con la onda difractada en el pequeño objeto semitransparente, que era en esos primeros días, a menudo una pieza de microfilm. El punto clave es que el patrón de interferencia u holograma contiene, por medio de la configuración de las franjas, información correspondiente tanto a la amplitud como a la fase de la onda esparcida por el objeto ^[1.1].

En los hologramas se puede almacenar tanto información bidimensional como tridimensional. La información puede ser de color o codificada, gráfica o alfanumérica. Esta información puede ser almacenada sobre la superficie del holograma o a lo largo de su volumen, espacialmente separada o sobrepuesta, como una grabado permanente o temporal^[1.2].

En la actualidad el almacenamiento de información requiere de una computadora. La información es procesada y almacenada en dispositivos electrónicos o memorias magnéticas. Sin embargo, se han desarrollado técnicas holográficas que han sido propuestas para memorias de computadora, es decir, se ha trabajado en el montaje de una multitud de hologramas en un archivo de memoria o unidad de almacenaje conectada al procesador central de una computadora.

No es difícil mostrar que los métodos de almacenamiento holográficos tienen ventajas sobre otros métodos ópticos tales como grabaciones de microimagen, aunque sus reales y formidables competidores son las bien atrincheradas memorias

magnéticas. La memoria holográfica puede llevar a cabo la recuperación de información en microsegundos, mientras que las cintas magnéticas, discos duros y diskettes requieren décimas de milisegundos. Sin embargo, la información en las cintas magnéticas además de poder ser borrada, se puede recuperar tan rápido como fue grabada^[1.2].

Hoy en día se puede realizar el grabado y reconstrucción de imágenes en materiales fotorrefractivos. Debido a su capacidad de grabado de imágenes, estos materiales son atractivos para su uso en holografía en tiempo real.

Generalmente a la luz esparcida o dispersada por un objeto al ser iluminado se le da el nombre de “*onda objeto*”, mientras que una “*onda de referencia*” es por lo regular una onda plana. Decimos entonces que una onda objeto es holográficamente grabada al mezclarla con una onda de referencia. La intensidad de la suma de las dos ondas forma un patrón de interferencia senoidal, el cual es grabado en el cristal fotorrefractivo en la forma de una variación de índice de refracción. El cristal entonces sirve como un holograma de volumen de fase. Para reconstruir la onda objeto almacenada, el cristal debe ser iluminado con la onda de referencia. Actuando como una rejilla de difracción de volumen, el cristal refleja la onda de referencia y reproduce la onda objeto.

Debido a que el proceso de grabado es relativamente rápido, éste y el proceso de reconstrucción pueden ser llevados a cabo simultáneamente^[1.3].

En la actualidad existen ya sistemas ópticos para el grabado y recuperación de grandes cantidades de información holográfica de una manera rápida, además de que con la llegada de los materiales fotorrefractivos, dicha información puede ser removida para poder grabar nueva información. Sin embargo, estos sistemas utilizan el sistema 4f, por lo que es necesaria la utilización de tres lentes, una para colimar el haz láser y las otras dos para formar la imagen^[1.4, 1.5, 1.6].

Por lo tanto, el propósito de este trabajo es el de presentar el prototipo de un sistema híbrido basado en un cristal fotorrefractivo que permite llevar a cabo el proceso de grabado, lectura y borrado de información holográfica en forma dinámica. Esta memoria holográfica dinámica consta básicamente de dos partes. La primera y

más importante consiste en un sistema óptico basado en una arquitectura de una sola lente que permite grabar, reconstruir y borrar imágenes en un cristal fotorrefractivo de una manera ilimitada sin necesidad de más elementos ópticos. La segunda parte del sistema consiste en el diseño y construcción de un sistema electrónico de posicionamiento.

El cristal fotorrefractivo es colocado en el dispositivo electrónico de posicionamiento para poder realizar la localización de los puntos en los que se graba la información sobre una de sus caras, este proceso de localización es realizado de una manera rápida y precisa y controlado por medio de una computadora. El dispositivo es de una gran precisión, de tal manera que se puede llegar a realizar la localización de 16 millones de puntos en un centímetro cuadrado. En este trabajo solamente nos interesa tener control sobre la localización de nueve puntos diferentes en un área aproximada de un centímetro cuadrado. El proceso de localización de los puntos, como ya se mencionó, es realizado con la ayuda de una computadora en la que por medio de un programa se generan señales de control y son sacadas a través del puerto paralelo de la misma. Estas señales de control van directamente a un Dispositivo Lógico Programable (PLD), el cual genera secuencias de movimiento para dos motores de paso los cuales pueden ser acoplados directamente a la montura y con los cuales puede llevarse a cabo la localización rápida y precisa de los puntos de interés en el cristal fotorrefractivo.

Por su característica de una sola lente en nuestro sistema, éste es más fácil de armar, además de que elimina la necesidad de una lente para reconstruir la imagen, utilizando para este propósito solamente el mismo haz de referencia.

Para lograr nuestro objetivo, el presente trabajo se ha organizado de la siguiente manera.

En el capítulo 2 se da un breve repaso sobre la teoría general de holografía. En esta parte se describe brevemente la forma matemática del proceso de grabado y reconstrucción de los hologramas, así como los conceptos de hologramas planos y de volumen.

En el capítulo 3 se da la teoría simplificada de materiales fotorrefractivos, en donde se pueden ver las principales características de este tipo de materiales y se describe el proceso de grabado y reconstrucción de información holográfica en los mismos, así como sus ventajas y sus aplicaciones dentro de sistemas ópticos.

En el capítulo 4 se discute la arquitectura general del sistema óptico propuesto de una sola lente, en el se van describiendo y detallando cada una de las partes que lo conforman y explicando por medio de una serie de figuras el proceso de grabado, reconstrucción y borrado de imágenes en nueve puntos de una de las caras del cristal fotorrefractivo.

Como ya se ha mencionado, una de las partes fundamentales de nuestro sistema es el de la incorporación del sistema de posicionamiento, por lo que la descripción de esta parte se desarrolla en el capítulo 5, donde se dan los detalles de diseño e implementación de este sistema, así como la forma en que se realiza el acoplamiento tanto a la computadora como a la montura de desplazamiento en el sistema óptico.

En el capítulo 6 se presentan los resultados experimentales del sistema propuesto. Por último, en el capítulo 7 damos las conclusiones generales del proceso de desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1.1] *OPTICA*; Eugene Hecht, Alfred Zajac, Adelphi University; Fondo educativo Interamericano, 1986.
- [1.2] *OPTICAL HOLOGRAPHY*, Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin; Academic Press, 1971.
- [1.3] *FUNDAMENTALS OF FOTONICS*; B. E. A. Saleh y M. C. Teich; Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [1.4] *METHOD FOR HOLOGRAPHIC STORAGE USING PERISTROPHIC MULTIPLEXING*; Kevin Curtis, Allen Pu, and Demetri Psaltis; Department of Electrical Engineering, California Institute of Technology; July 1, 1994/ Vol 19, No. 13/ OPTICS LETTERS; Optical Society of America.
- [1.5] *STORAGE OF 500 HIGH-RESOLUTION HOLOGRAMS IN A LiNbO_3 CRYSTAL*; F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll; Northrop Research and Technology Center, Palos Verdes Península, California 90274; April 15, 1991/ Vol. 16, No.8/ OPTICS LETTERS; Optical Society of America.
- [1.6] *ANGLE-MULTIPLEXED STORAGE OF 5000 HOLOGAMS IN LITHIUM NIOBATE*; F. H. Mok; Optics Letters; Vol. 18, No. 11, 1993.

CAPITULO 2

HOLOGRAFIA

2.1 Introducción

Para poder hablar de memorias holográficas es necesario tomar en cuenta los aspectos clásicos de la holografía, los cuales describimos aquí brevemente.

La holografía es un modo de grabar y reconstruir ondas inventado por Dennis Gabor en 1948. La palabra *holografía* se origina de la palabra griega “*holos*” que significa “*completo*”. Al utilizar esta palabra, el inventor de la holografía quería acentuar o hacer hincapié en que se grababa información completa acerca de la onda en amplitud y fase.

Como ya se mencionó en la fotografía convencional, solamente la distribución del cuadrado de la amplitud es grabada en una proyección bidimensional de un objeto sobre el plano de la fotografía. Por esta razón, cuando examinamos una fotografía desde varias direcciones, no obtenemos nuevos ángulos de aproximación y no podemos ver que hay en la parte posterior de los objetos.

Un holograma, al contrario, regenera no una imagen bidimensional de un objeto, pero si el campo de la onda el cual es esparcido. De esta manera cuando cambiamos nuestro punto de observación dentro de los confines de este campo de

onda, vemos el objeto desde diferentes ángulos, percibiendo su naturaleza tridimensional real^[2.1].

De lo mencionado hasta aquí podemos concluir que en una fotografía se graba la imagen real de un objeto formado por una lente, y en un holograma se graba generalmente la distribución de campo que resulta de la luz dispersada por un objeto. Por lo que el grabado del campo dispersado proporciona mucho más información acerca del objeto que aquella de la imagen real grabada en una fotografía^[2.2].

La holografía se originó mucho antes de la invención del láser, pero fue necesario esperar el advenimiento de este dispositivo antes de que su aplicación a la ingeniería diese frutos. Actualmente ha encontrado bastante aceptación en la industria, en áreas tan diversas como análisis de vibraciones, procesamiento de imágenes, medición e inspección visual de partículas, mientras que los elementos ópticos producidos holográficamente, son componentes esenciales en pantallas para guiar aeronaves, en exploradores utilizados en supermercados y en computadoras ópticas entre otras^[2.3].

2.2 Ilustración gráfica del principio de holografía

Para comprender las propiedades únicas de la holografía es de utilidad si primero se compara con el proceso fotográfico. En la figura 2.1 se muestra una escena iluminada con luz de banda ancha de una fuente luminosa externa, como el Sol o un tubo de descarga.

La luz reflejada por el objeto es colectada mediante una lente y proyectada sobre un detector como película fotográfica. Sabemos que para describir matemáticamente la distribución de la luz en un plano dado es necesario especificar su amplitud y su fase.

La película fotográfica sólo es sensible al cuadrado de la distribución del campo eléctrico y, por tanto, registra la distribución de la luz como una variación bidimensional de la intensidad de la luz a través del plano de la imagen. La

información de fase se pierde. Ya que es esta relación de fase entre los diferentes rayos de luz cuando se encuentran en la película lo que revela la historia temporal relativa de cada rayo, la pérdida de tal componente compromete la capacidad de grabado con tridimensionalidad y paralaje de una escena.

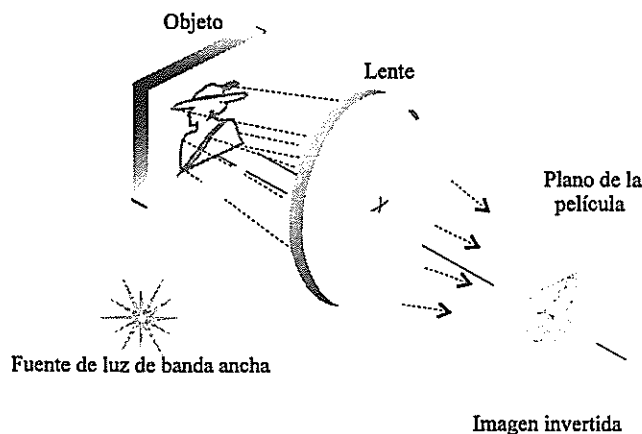


Figura 2.1 Ilustración gráfica del proceso fotográfico.

En contraste, en la figura 2.2 se muestran los elementos básicos del grabado holográfico. Algunas diferencias surgen de inmediato entre este procedimiento y el relacionado con la fotografía. En general, en el proceso de formación de la imagen no se utilizan lentes, ya que lo que incide en el medio de grabado es el frente de ondas de la luz reflejada por el objeto, y no una imagen enfocada de aquel.

A continuación en el proceso de grabado se utilizan dos haces luminosos, en vez de uno. La intensidad de la fuente luminosa es dividida en dos y cada una de las partes recorre una trayectoria diferente. Una parte, la *onda de referencia*, es expandida por una lente e ilumina directamente el medio de grabado holográfico. La segunda parte, la *onda objeto*, también es expandida y dirigida hacia el objeto en sí. El frente de ondas reflejado por el objeto se desplaza hacia el medio de grabado, donde se combina con el haz de referencia. La forma en que se combinan ambos haces está regida por la tercera diferencia significativa entre la holografía y la fotografía, es decir, que se utiliza un láser como fuente de iluminación, en vez de luz de banda ancha.

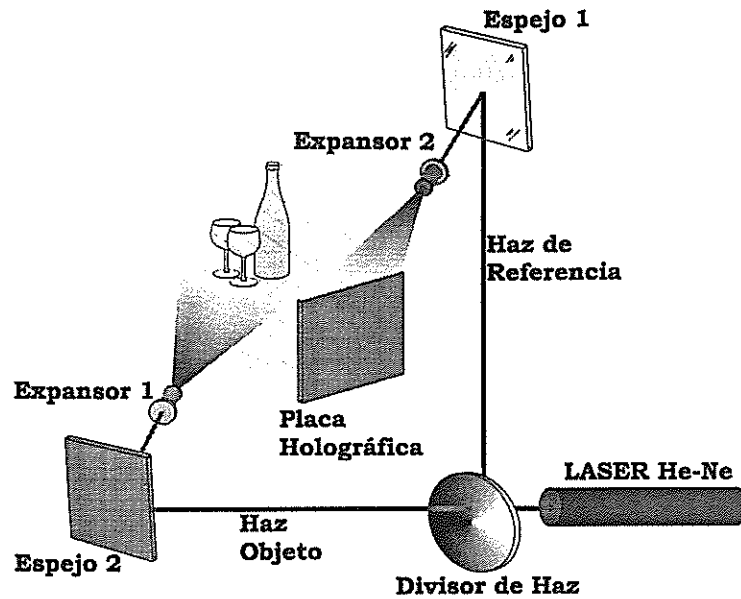


Figura 2.2 Ilustración gráfica del proceso de grabado Holográfico.

Como sabemos, los láseres son fuentes de luz coherente y dado que los haces objeto y de referencia se obtienen del mismo láser, ambos son mutuamente coherentes, y por consiguiente pueden interferir para formar un patrón bidimensional de intensidad luminosa en el espacio. Es en la formación y registro de este patrón de interferencia que estriba la clave del proceso holográfico. En general, el campo de interferencia holográfico es capturado en película holográfica. La película holográfica difiere de la película utilizada en la fotografía normal sólo en que los granos del haluro de plata son del orden de unos cuantos nanómetros, en comparación con los micrómetros que miden los granos de haluro de plata de la fotografía normal.

2.3 Descripción matemática del principio de holografía.

Hasta aquí solo hemos visto las diferencias cualitativas entre el proceso fotográfico y los elementos básicos requeridos para el grabado holográfico. En esta sección veremos el principio de holografía de una manera más cuantitativa. Para esto supongamos que tenemos un haz láser y que lo dividimos en dos partes, una de estas partes ilumina el objeto (*haz objeto-O*), y la otra parte ilumina la placa fotográfica

directamente (*haz de referencia-R*). El material donde se graba la superposición del haz objeto *O* y el haz de referencia *R* es un *holograma*.

Como se ha indicado anteriormente el problema de reconstrucción de un frente de onda consiste de dos operaciones distintas: un paso para el grabado o detección y otro para la reconstrucción.

En el primer paso es necesario detectar información de amplitud y fase de las ondas. Sin embargo, todos los medios de grabado responden solamente a la intensidad de la luz. Por lo que es necesario que la información de la fase sea convertida a variaciones de intensidad para que esta pueda ser grabada.

Una técnica estándar para llevar a cabo esta tarea es la interferometría, es decir, un segundo frente de onda (onda de referencia), mutuamente coherente con el primero y de amplitud y fase conocidas, es agregado al frente de ondas esparcido por un objeto (onda objeto), como se muestra en la figura 2.3.

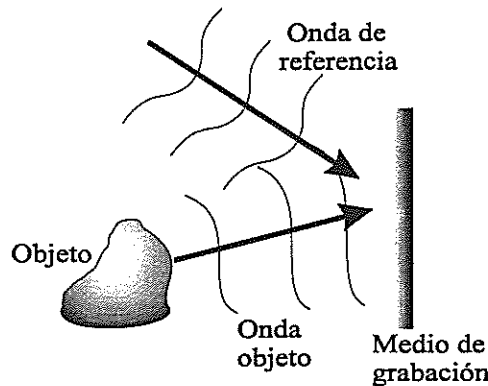


Figura 2.3 Grabado interferométrico.

La intensidad de la suma de los dos campos complejos depende entonces de la amplitud y fase del frente de ondas esparcido por el objeto. Así, si

$$O(x, y) = |O(x, y)| \exp[-j\phi(x, y)], \quad (2.1)$$

representa el frente de onda dispersado por el objeto, y si

$$R(x, y) = |R(x, y)| \exp[-j\psi(x, y)], \quad (2.2)$$

representa la onda de referencia con la cual $O(x, y)$ interfiere, la intensidad de la suma esta dada por

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + 2|R(x, y)||O(x, y)|\cos[\psi(x, y) - \phi(x, y)]. \quad (2.3)$$

Mientras que los dos primeros términos de esta expresión dependen solamente de las intensidades individuales de las ondas, el tercer término depende de sus fases relativas. De esta manera la información de amplitud y fase de la onda objeto es grabada. Como ya se ha mencionado anteriormente el material donde es grabado el patrón de interferencia entre la onda objeto y de referencia es considerado un holograma^[2.5].

El material más utilizado para grabar el patrón de interferencia es la película fotográfica. La película consiste de una emulsión de haluros de plata depositada sobre un vidrio o base sintética. Cuando la película es expuesta a la luz, el haluro de plata es descompuesto y los átomos de plata son liberados de acuerdo a la cantidad de energía absorbida. Después de un proceso químico de revelado, la película queda como una transparencia no uniforme y una función de transmitancia de amplitud de tipo variable es formada^[2.6].

El material utilizado para grabar el patrón de interferencia debe proporcionar una región gráfica lineal con respecto a la intensidad incidente durante el proceso de detección y debe ser capaz de registrar franjas de alta frecuencia. Esta relación lineal es proporcionada por la operación en la porción lineal de la curva de la emulsión t_A vs E . De esta manera asumimos que las variaciones de exposición en el patrón de interferencia permanezcan dentro de la porción lineal de la curva. Finalmente, si asumimos que la intensidad de la onda de referencia $|R(x, y)|^2$ es uniforme a través del material grabado, entonces la función de transmitancia en amplitud de la película o placa revelada puede ser escrita como

$$t_A(x, y) = t_b + \beta'(|O|^2 + R^*O + RO^*), \quad (2.4)$$

donde t_b es una transmitancia uniforme inicial establecida por la exposición de referencia constante, y β' es el producto de la pendiente β de la curva t_A vs E en un punto determinado y el tiempo de exposición.

Una vez que la información de fase y amplitud de la onda objeto $O(x, y)$ ha sido grabada, sólo queda la parte de la reconstrucción de la onda. Supongamos que la transparencia revelada es iluminada por una onda de reconstrucción coherente $B(x, y)$. La luz transmitida por la transparencia es entonces

$$\begin{aligned} B(x, y)t_A(x, y) &= t_b B + \beta' O O^* B + \beta' R^* B O + \beta' R B O^* \\ &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Hay que observar que si B no es mas que el mismo haz de referencia, entonces el tercer término de esta ecuación es

$$U_3(x, y) = \beta' |R(x, y)|^2 O(x, y). \quad (2.6)$$

Ya que la intensidad de la onda de referencia es uniforme, la componente de la onda reconstruida U_3 multiplicada por una constante, es un duplicado exacto del frente de onda original $O(x, y)$ como se muestra en la figura 2.4 (a).

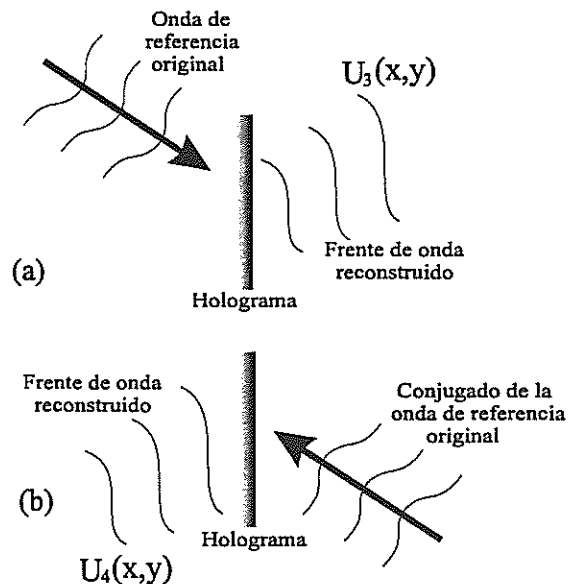


Figura 2.4 Reconstrucción del frente de onda con (a) Onda de referencia original
(b) Conjugado de la onda de referencia.

De una manera similar, si ahora $B(x, y)$ es la onda conjugada de la onda de referencia original, es decir, $R^*(x, y)$, el cuarto término del campo reconstruido es

$$U_4(x, y) = \beta^* |R(x, y)|^2 O^*(x, y), \quad (2.7)$$

el cual es proporcional al conjugado del frente de onda original, como se muestra en la figura 2.4 (b).

Hay que observar que en ambos casos, la componente del campo de interés esta acompañada por otras tres componentes de campo, las cuales pueden entenderse fácilmente si analizamos el proceso de grabado y reconstrucción del frente de onda de una manera gráfica. Esta descripción permitirá además tocar algunos de los aspectos técnicos de la implementación del proceso holográfico. Consideremos la simple situación de interferencia entre dos ondas planas de luz monocromática coherente a las que llamaremos nuevamente *onda de referencia* y *onda objeto*, que se encuentran en el espacio formando un ángulo θ (figura 2.5).

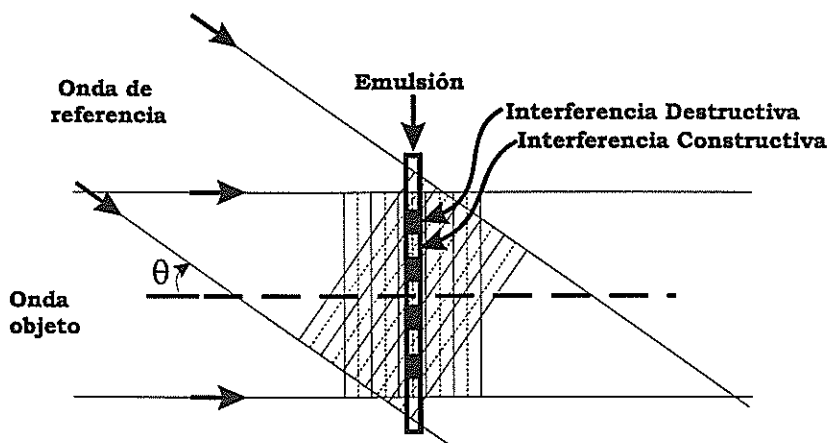


Figura 2.5 Interferencia entre dos ondas planas.

Debido a que los dos haces son coherentes entre sí, las crestas y valles producirán por superposición el característico patrón de interferencia de dos haces, de líneas paralelas alternas oscuras y brillantes.

Si el campo de interferencia se registra en película fotográfica de grano fino, entonces este patrón de interferencia actuará como una rejilla de difracción sinusoidal.

Al iluminar la rejilla con uno de los dos haces utilizados en su construcción, por ejemplo el de referencia, se generan tres haces en el lado opuesto de la rejilla (figura 2.6). Un haz, *el recto*, pasa a través de la película en línea recta con el frente de ondas de iluminación. Un segundo haz se propaga formando un ángulo $+\theta$ con el haz de referencia o haz recto, en línea con la dirección aparente del *haz objeto* y representa una réplica de la onda objeto, y además es denominada también *onda primaria*.

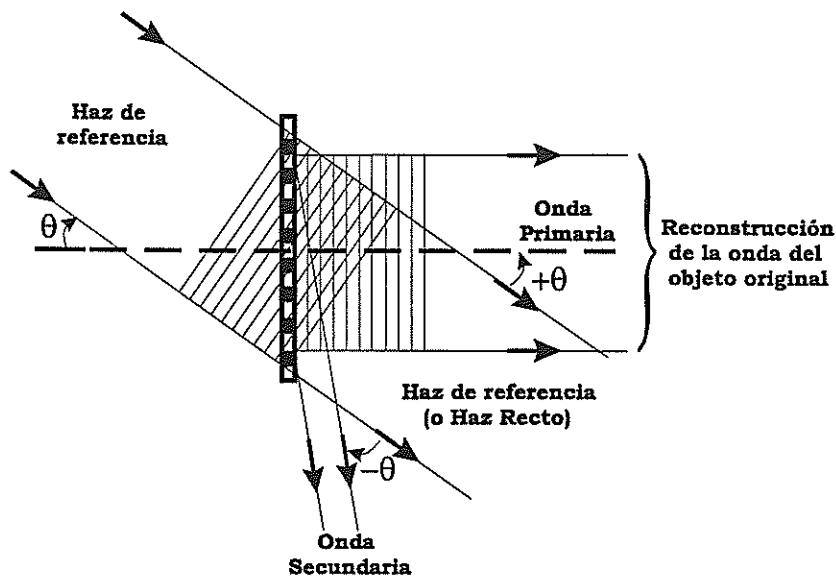


Figura 2.6 Reconstrucción a partir de la difracción de una onda plana.

El tercer haz, denominado *onda secundaria* se propaga formando un ángulo $-\theta$ con el haz recto y contiene elementos tanto del haz de referencia como del haz objeto. Por consiguiente, se ha producido una imagen de la onda objeto mediante la iluminación de la rejilla de difracción bidimensional con la onda de referencia.

Ahora, suponga la situación en donde uno de los haces que forman parte del proceso de interferencia no es una onda plana, si no que es la luz reflejada por algún objeto iluminado y nuevamente le llamamos haz objeto. Entonces, este haz tendrá un frente de ondas complicado representando la distribución de amplitud y fase de la luz en el objeto. El patrón de interferencia así registrado también será un campo complejo de amplitud y fase variables. Lo que se ha efectuado entonces, es la modulación de

amplitud y fase de una onda de referencia fija con la distribución de la luz del objeto iluminado.

Una vez más, al capturar este campo de interferencia en película fotográfica, la amplitud y la fase de la luz reflejada por el objeto se registran sobre un medio bidimensional. Una vez hecho esto se puede decir que se han almacenado en película todas las características ópticas de la escena original, con la excepción notable del color, es decir, se ha grabado un holograma.

Al iluminar el holograma con un duplicado exacto de la onda original de referencia, en términos de su longitud de onda, curvatura y ángulo de iluminación, se obtiene una respuesta semejante a la de la difracción de la luz por la rejilla senoidal, es decir se generan nuevamente tres ondas. El haz recto de irradiancia esencialmente uniforme se propaga en la misma dirección que la onda de referencia. La onda primaria es generada a un ángulo $+\theta$ con la de referencia y reproduce la onda objeto original. Si el ojo intercepta esta onda, no es capaz de distinguir entre ella y la original. El ojo ve una imagen a escala natural de la escena original, que parece estar localizada detrás de la placa fotográfica. El ojo forma una *imagen virtual* del objeto original (figura 2.7)^[2.4].

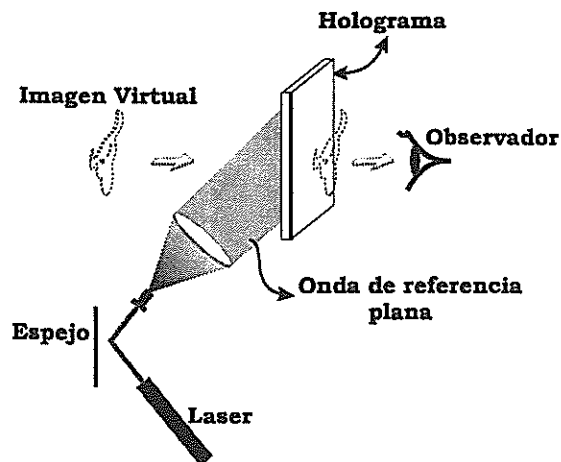


Figura 2.7 Reconstrucción de la imagen virtual de un objeto.

La onda secundaria avanza a un ángulo $-\theta$ con la onda de referencia y contiene componentes tanto de la onda objeto como de la onda de referencia como ya se había mencionado anteriormente.

Para efectos de inspección visual, la reconstrucción de imagen virtual no es la manera más idónea de reconstrucción holográfica. Si la placa se hace girar y se ilumina por detrás con una onda que sea el conjugado exacto del haz de referencia, entonces una imagen conjugada estará localizada en el espacio real enfrente de la placa como se muestra en la figura 2.8. La imagen así formada es ópticamente idéntica a la original, salvo que parece estar invertida, el lado izquierdo está a la derecha y la parte de atrás está al frente. Esta imagen es llamada *imagen real pseudoscópica* y constituye la base de un método de inspección visual.

La utilización de la holografía en la inspección visual estriba en la creación y optimización de la imagen real de una escena u objeto. La imagen real o, más correctamente, la imagen conjugada se forma y reconstruye como se muestra en la figura 2.8. A menudo se utiliza un haz de referencia plano para registrar el holograma, ya que así para la reconstrucción de la imagen conjugada solamente es necesario girar el holograma. Si en el grabado se utilizara un haz de referencia divergente, entonces, en la reconstrucción sería necesario un haz convergente de idéntica curvatura.

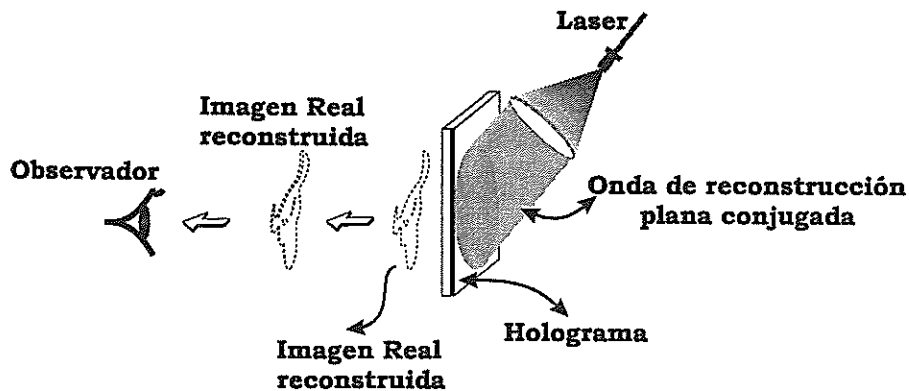


Figura 2.8 Reconstrucción de la imagen real pseudoscópica.

Hasta aquí hemos visto los aspectos más importantes de los hologramas en términos generales. En la sección siguiente se hará una clasificación de los mismos en función del grosor de la emulsión. Además veremos un poco de información sobre

hologramas de transparencias y la diferencia entre el holograma de Fresnel y el de Fraunhofer u holograma de la transformada de Fourier.

2.4 Hologramas Planos y de Volumen.

Un holograma de volumen es aquel en el cuál el grosor del medio de grabado es del orden o más grande que el espaciamiento de las franjas grabadas. El espaciamiento de las franjas en un holograma depende del ángulo entre el haz objeto y el de referencia, si el ángulo está entre 7 u 8 grados y es utilizada luz visible, entonces, los hologramas hechos con película fotográfica o placa deben ser considerados hologramas de volumen. En este caso el espaciamiento de las franjas puede ser del orden de dos micras, mientras que el grosor de la emulsión puede ser del orden 5 a 20 micras.

Los hologramas de volumen son muy convenientes para el almacenamiento de información, ya que el volumen completo del medio de grabado puede ser utilizado, también pueden ser utilizados para la reconstrucción holográfica de tres colores o se puede utilizar el volumen completo del medio de grabado de tal forma que los frentes de onda pueden ser reconstruidos por reflexión. Estas son solo algunas de las aplicaciones útiles de los hologramas de volumen.

Por otro lado los hologramas planos son aquellos que son grabados en un medio que es considerado bidimensional, aunque realmente representan un caso especial de los hologramas de volumen, excepto en algunas instancias especiales de verdaderos hologramas planos.

La característica principal de los hologramas de volumen, distinta de los hologramas planos, es que sola una imagen es formada para cada dirección de incidencia del haz de iluminación. Si un holograma de volumen de un objeto es formado en la misma manera que para un holograma plano, entonces, una imagen primaria (virtual), libre de aberración es formada en la posición original del objeto solamente si el haz de iluminación es idéntico al haz de referencia usado para grabar

el holograma. Igualmente una imagen conjugada libre de aberración es formada en la posición del objeto original, solamente si todos los rayos en el sistema son invertidos.

Los hologramas de transparencias tienen la desventaja de que hay una correspondencia de casi 1:1 entre los puntos del objeto y la posición sobre el holograma, es decir, el holograma es esencialmente una sombra del objeto. De esta manera aunque una parte de un holograma de un objeto difuso tiene un efecto menor al recuperar la información, para los hologramas de transparencias dañar una parte del holograma significaría perder la información de la imagen grabada en esa parte.

Los hologramas pueden ser grabados con haces de referencia divergentes, paralelos o convergentes. Si se tiene cuidado de mantener la geometría de grabado durante el proceso de reconstrucción, es posible formar hologramas con un haz de referencia arbitrario; el único requerimiento es que este haz sea coherente con el haz objeto.

Un holograma formado con un objeto cercano es llamado un holograma de Fresnel. Sin embargo, existe otra clase de hologramas los cuales son de gran importancia, estos son llamados hologramas de Fraunhofer o de la transformada de Fourier. En este tipo de hologramas un objeto plano es colocado en el plano focal de la lente, de tal manera que cada punto objeto da salida a un haz paralelo de luz incidente sobre la placa fotográfica. El haz de referencia es colimado y también se hace incidir sobre la placa a un ángulo determinado con respecto al haz objeto. De esta forma tanto el objeto como la fuente de referencia están efectivamente en el infinito. Para la reconstrucción, una segunda lente es usada, la cual no necesariamente debe ser de la misma distancia focal que la lente utilizada en el proceso de grabado. Tanto la imagen primaria como la conjugada serán formadas en el plano focal de esta lente amplificadas en la razón $f_2:f_1^{[2,7]}$.

Los hologramas de este tipo algunas veces son llamados hologramas de la transformada de Fourier, debido a que la placa fotográfica es colocada a una distancia focal f_1 de la lente, la distribución de luz en el holograma que es causada por el objeto, se aproxima muy cercanamente a la transformada de Fourier de la distribución de luz que llega al objeto. Este tipo de hologramas son, por lo regular utilizados para

el almacenamiento de información a grandes escalas debido a que el área en donde se graba el holograma es muy pequeña.

La situación anterior puede ser aproximada cuando el objeto y el punto de referencia se encuentran en el mismo plano y no se usan lentes, tal holograma ha sido llamado holograma de la transformada de Fourier sin lentes, debido a que en una primera aproximación cada punto del objeto da lugar a franjas de una simple frecuencia espacial a través de la placa fotográfica.

En este trabajo nosotros realizamos hologramas de volumen de la transformada de Fourier, es decir hologramas de Fraunhofer. Durante mucho tiempo este tipo de hologramas se han realizado utilizando sistemas ópticos cuya arquitectura general consta de más de una sola lente, sistemas tales como el conocido sistema 4f. En este trabajo se realizará el grabado y reconstrucción de este tipo de hologramas utilizando nuestro sistema óptico propuesto cuya arquitectura consta de una sola lente. La lente solamente es utilizada en el proceso de grabado, mientras que para el proceso de reconstrucción no es necesario mas que el mismo haz de referencia.

REFERENCIAS

- [2.1] *HOLOGRAPHY AND ITS APPLICATION*; Yu. I. Ostrovsky, Mir Publishers, Moscow.
- [2.2] *ENGINEERING OPTICS*; Keigo Iizuka; Springer Series in Optical Sciences, Volume 35.
- [2.3] *OPTOELECTRONICS*; J. Watson; Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores.
- [2.4] *OPTICAL HOLOGRAPHY*, Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin; Academic Press, 1971.
- [2.5] *INTRODUCTION TO FOURIER OPTICS*; Joseph W. Goodman, The McGraw-Hill Companies, Inc. 1996.
- [2.6] *ELECTROMAGNETICS AND OPTICS*; E. E. Kriezis, D.P. Chrissoulidis & A.G. Papagiannakis; World Cientific, 1992.
- [2.7] *PRINCIPLES OF HOLOGRAPHY*; Howard M Smith; Wiley-Interscience, A Division of John Wiley & Sons.

CAPITULO 3

PROCESO DE GRABADO EN UN MATERIAL FOTORREFRACTIVO

3.1 Introducción

Debido a que el elemento de grabado de nuestro sistema es un cristal fotorrefractivo de Niobato de Litio, describiremos brevemente el proceso de grabado en este tipo de materiales y mencionaremos sus principales características. En especial queremos resaltar el hecho de que se forma un holograma de volumen y de fase, lo que implica una gran eficiencia de difracción.

El efecto fotorrefractivo esta basado en la redistribución de cargas generadas bajo una iluminación no uniforme conduciendo a un patrón de campo eléctrico interno que modula el índice de refracción a través del efecto electro-óptico. Se puede decir que la fotorrefractividad puede ser observada en materiales que son fotoconductores y electro-ópticos simultáneamente^[3.1].

Este efecto fue descubierto en 1966 cuando se estaba estudiando la transmisión de haces láser a través de cristales electro-ópticos. Se encontró que la presencia del haz láser a través del cristal electro-óptico conducía a una inhomogeneidad en el índice de refracción, la cuál distorsionaba el frente de onda del

haz láser transmitido. Tal efecto fue referido en ese tiempo como “daño óptico”. Desde entonces el efecto fotorrefractivo ha sido observado en muchos cristales electro-ópticos tales como titanato de bario (BaTiO_3), bismuto-silicio-óxido ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$), niobato de litio (LiNbO_3), niobato de potasio (KnbO_3), arsenuro de galio (GaAs), estroncio-bario-niobato (SBN), etc.^[3,2]

Los materiales fotorrefractivos son el medio más eficiente para el grabado de hologramas dinámicos de volumen. En ellos la información puede ser almacenada, leída y borrada en tiempo real. Otra característica importante en este medio, es la presentación del fenómeno conocido como transferencia de energía entre los haces que graban en el holograma en una configuración de mezcla de dos ondas (TWM). La transferencia de energía es debida al corrimiento de fase espacial entre la rejilla de índice y las franjas del patrón de interferencia que forman el holograma. Aplicaciones de transferencia de energía incluyen amplificación de haces e imágenes, filtros tipo Novelty, etc.^[3,2]

3.2 Materiales fotorrefractivos

Cuando un material fotorrefractivo es expuesto a la luz, portadores libres de carga (huecos o electrones) son generados por excitación desde los niveles de energía de las impurezas a una banda de energía, a una razón proporcional a la potencia óptica. Estos portadores se difunden alejándose de las posiciones de alta energía donde fueron generados, dejando atrás cargas fijas de signo opuesto (asociadas con los iones de impurezas). Los portadores libres pueden entonces ser atrapados por impurezas ionizadas en otras localidades, depositando su carga así como se van recombinando. El resultado es la creación de una distribución de carga espacial inhomogénea que puede permanecer en su lugar por un periodo de tiempo después de que la luz es suspendida. Esta distribución de carga crea un patrón de campo eléctrico interno que modula el índice refractivo local del material en virtud del efecto electro-óptico. El material puede regresar a su estado original iluminándolo con luz uniforme o calentándolo. Así estos materiales pueden ser usados para grabar y almacenar

imágenes de una manera muy parecida a como se almacenan imágenes en emulsiones fotográficas. El proceso hasta aquí mencionado se ilustra en la figura 3.1 para Niobato de Litio (LiNbO_3).

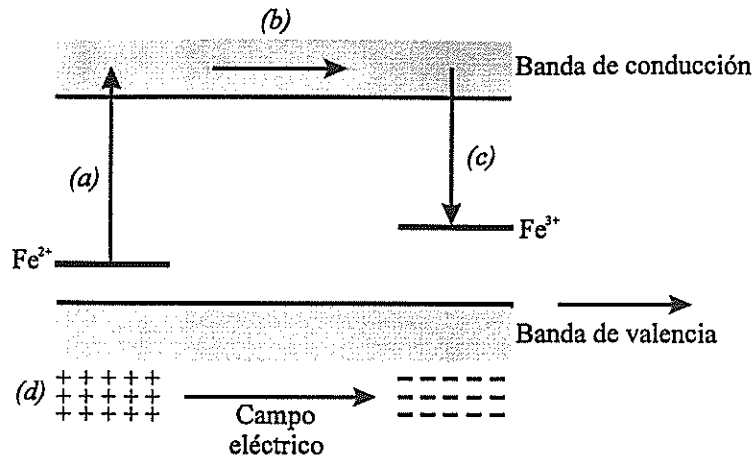


Figura 3.1 Diagrama de niveles de energía de LiNbO_3 que ilustran los procesos de (a) fotoionización, (b) difusión, (c) recombinación, y (d) formación de carga espacial y generación de campo eléctrico. Los centros de impurezas Fe^{2+} actúan como donadores, llegando a ser Fe^{3+} cuando son ionizados; mientras centros Fe^{3+} actúan como trampas, llegando a ser Fe^{2+} después de la recombinación.

3.3 Teoría simplificada de fotorrefractividad

Si un material fotorrefractivo es iluminado con luz cuya intensidad está dada por la función $I(x)$ y cuyo cambio en el índice de refracción está dado por $\Delta n(x)$, tenemos que una descripción paso a paso del proceso que media el efecto y un juego simplificado de las ecuaciones que lo gobiernan están dadas de la manera que se muestra a continuación.

Fotogeneración. La absorción de un fotón en la posición x eleva un electrón del nivel donador a la banda de conducción. La razón de fotoionización $G(x)$ es proporcional a la intensidad óptica y a la densidad de donadores no ionizados. Así,

$$G(x) = s(N_D - N_D^+)I(x) \quad (3.1)$$

donde N_D es la densidad de donadores, N_D^+ es la densidad de donadores ionizados, y s es una constante conocida como la sección transversal de fotoionización.

Difusión. Debido a que $I(x)$ no es uniforme, la densidad de electrones excitados $n(x)$ tampoco es uniforme. Como resultado, la difusión de electrones se realiza de localidades de alta concentración a localidades de baja concentración.

Recombinación. La recombinación de electrones es realizada a una razón $R(x)$ proporcional a su densidad $n(x)$, y a la densidad de donadores ionizados (trampas) N_D^+ , de modo que

$$R(x) = \gamma_R n(x) N_D^+, \quad (3.2)$$

donde γ_R es una constante. En equilibrio, la razón de recombinación es igual a la razón de fotoionización, $R(x) = G(x)$, de forma que

$$sI(x)(N_D - N_D^+) = \gamma_R n(x) N_D^+, \quad (3.3)$$

de donde

$$n(x) = \frac{s}{\gamma_R} \frac{N_D - N_D^+}{N_D^+} I(x). \quad (3.4)$$

Carga espacial. Cada electrón fotogenerado deja atrás un ión con carga positiva. Cuando el electrón es atrapado (se recombina), esa carga negativa es depositada en un diferente sitio. Ya como resultado de esto, una distribución no uniforme de carga espacial es formada.

Campo eléctrico. La carga espacial no uniforme genera un campo eléctrico dependiente de la posición $E(x)$, el cuál puede ser determinado observando que en el estado estable las densidades de corriente eléctrica en la deriva y la difusión, deben

ser de igual magnitud pero de signo opuesto, de tal manera que la corriente total se desvanece, es decir,

$$J = e\mu_e n(x)E(x) - k_B T \mu_e \frac{dn}{dx} = 0, \quad (3.5)$$

donde μ_e es la movilidad del electrón, k_B es la constante de Boltzmann, y T es la temperatura. Así

$$E(x) = \frac{k_B T}{e} \frac{1}{n(x)} \frac{dn}{dx}. \quad (3.6)$$

Índice de refracción. Ya que el material es electro-óptico, el campo eléctrico interno $E(x)$ modifica localmente el índice de refracción de acuerdo con

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2} n^3 r E(x), \quad (3.7)$$

donde n y r son valores asignados para el índice de refracción y el coeficiente electro-óptico para el material.

La relación entre la intensidad de luz incidente $I(x)$ y el cambio de índice de refracción resultante $\Delta n(x)$ puede ser obtenida fácilmente si asumimos que la razón $\left(\frac{N_D}{N_D^+} - 1\right)$ en (3.4) es aproximadamente constante e independiente de x . En ese caso $n(x)$ es proporcional a $I(x)$, de modo que (3.6) nos da

$$E(x) = \frac{k_B T}{e} \frac{1}{I(x)} \frac{dI}{dx}. \quad (3.8)$$

Finalmente, sustituyendo esto en la ecuación (3.7) obtenemos una expresión para el cambio de índice de refracción en función de la intensidad,

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2} n^3 r \frac{k_B T}{e} \frac{1}{I(x)} \frac{dI}{dx}. \quad (3.9)$$

Esta ecuación se puede fácilmente generalizar a dos dimensiones, de lo cuál se puede derivar la operación de un material fotorrefractivo como un dispositivo de almacenamiento de información.

Muchas suposiciones fueron hechas en el desarrollo teórico anterior: obtener la ecuación (3.8) de la ecuación (3.6) se hizo suponiendo que la razón de densidad de donadores no ionizados e ionizados era aproximadamente uniforme, sin tomar en cuenta la variación espacial del proceso de fotoionización. Esta suposición es aproximadamente aplicable cuando la ionización es causada por otros procesos más efectivos que son independientes de la posición además del patrón de luz $I(x)$. No fueron tomados en cuenta la conductividad en la oscuridad y el efecto fotovoltaico. Eso fue suponiendo que no hubo campo eléctrico externo aplicado, aunque de hecho esto puede ser útil para ciertas aplicaciones. La teoría es válida solamente en el estado estable, aunque el tiempo dinámico del proceso fotorrefractivo es importante ya que esto determina la velocidad con la cuál el material fotorrefractivo responde a la luz aplicada. Sin embargo, a pesar de todas estas suposiciones, esta teoría simplificada contiene la esencia del comportamiento de los materiales fotorrefractivos^[3,4].

3.4 Detección de un patrón espacial senoidal de intensidad

Consideremos una distribución de intensidad en la forma de una rejilla senoidal de período Λ , contraste m , e intensidad media I_o , dada por

$$I(x) = I_o \left(1 + m \cos \frac{2\pi x}{\Lambda} \right), \quad (3.10)$$

tal y como se muestra en la figura 3.2.

Si sustituimos esta ecuación en las ecuaciones (3.8) y (3.9), obtendremos el campo eléctrico interno y la distribución del índice de refracción

$$E(x) = E_{max} \frac{-\sin\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right)}{1 + m \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right)}, \quad (3.11)$$

$$\Delta n(x) = \Delta n_{max} \frac{\sin\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right)}{1 + m \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right)}, \quad (3.12)$$

donde $E_{max} = 2\pi(k_B T / e\Lambda)m$ y $\Delta n_{max} = \frac{1}{2}n^3 r E_{max}$ son los valores máximos de $E(x)$ y $\Delta n(x)$, respectivamente. La respuesta de un material fotorrefractivo a este patrón espacial senoidal de luz se muestra en la figura 3.2.

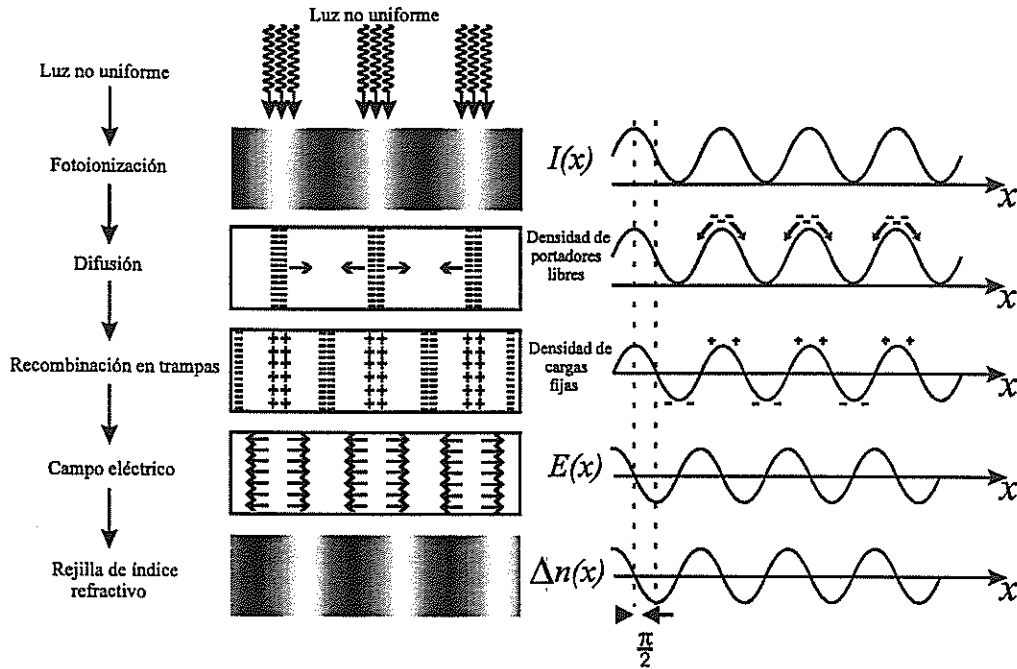


Figura 3.2 Respuesta de un material fotorrefractivo a un patrón espacial de luz senoidal.

En la figura 3.2 podemos observar una muestra de material fotorrefractivo dopada con impurezas donadoras y aceptoras, cuyos niveles energéticos yacen en algún lugar de la banda prohibida de energía del material. Al iluminar la muestra con el patrón sinusoidal de luz, se lleva a cabo el proceso de fotoionización, es decir, portadores de carga son generados mediante fotoexcitación, los cuales tienden a migrar hacia las zonas oscuras llevándose así el proceso de difusión. Enseguida, estos portadores de carga libre pueden ser atrapados por impurezas ionizadas en otras localidades, realizándose de esta forma la recombinación en trampas. Posteriormente como resultado de esta recombinación, tenemos la creación de una distribución de carga espacial, dicha distribución crea un patrón de campo eléctrico interno que a su vez modula el índice refractivo local del material en virtud del efecto electro-óptico.

En nuestro trabajo es necesaria la utilización de un material fotorrefractivo, debido a la necesidad de llevar a cabo el proceso de grabar y borrar información por un número ilimitado de veces sobre el mismo material. La razón por la cual seleccionamos un cristal de Niobato de Litio fue debido a que este es el más indicado para grabado de información holográfica utilizando un láser de He-Ne, el tiempo de almacenamiento en el mismo puede ser de hasta meses bajo ciertas condiciones ambientales y además su capacidad de almacenamiento es muy grande lo cual es indispensable para trabajos posteriores. Se pudo utilizar un material fotopolímero, sin embargo este tipo de materiales tienen la desventaja de que se degradan fácilmente. Ya existen trabajos en donde se utilizan este tipo de materiales, solo que en la mayoría de ellos es incorporada la arquitectura del sistema 4f, en donde como se mencionó anteriormente es necesaria la incorporación de tres lentes, a diferencia de nuestro sistema en donde solo es necesaria la incorporación de una sola lente. En el capítulo siguiente se hará la descripción detallada de la arquitectura completa de nuestro sistema propuesto y en donde se lleva a cabo el proceso de grabado de información en un cristal fotorrefractivo.

REFERENCIAS

- [3.1] *NONLINEAR OPTICS OF ORGANIC MOLECULES AND POLYMERS*; Edited by Hari Singh Nalwa, Seizo Miyata; CRC Press, 1997.
- [3.2] *INTRODUCTION TO PHOTOREFRACTIVE NONLINEAR OPTICS*; Pochi Yeh; A Wiley-Interscience Publication; 1993.
- [3.3] *FUNDAMENTALS OF FOTONICS*; B. E. A. Saleh y M. C. Teich; Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1991.

CAPITULO 4

DESCRIPCION DEL SISTEMA OPTICO PROPUESTO

4.1 Introducción

En este capítulo daremos una descripción completa de la arquitectura de nuestro sistema óptico propuesto, el cuál como ya se mencionó consta de una sola lente.

La mayoría de los sistemas ópticos utilizados para el registro de hologramas utilizan arquitecturas en donde es necesaria la utilización de más de tres lentes^[4.1, 4.2, 4.3]. Cabe destacar que estas arquitecturas son utilizadas para llevar a cabo el registro de grandes cantidades de información holográfica, desde 295 hologramas en película HRF-150 fotopolímera^[4.1], hasta 5000 hologramas en un cristal fotorrefractivo de Niobato de Litio (LiNbO_3)^[4.2].

El objetivo de este trabajo es demostrar experimentalmente que con la arquitectura propuesta de una sola lente en esta tesis es posible obtener el mismo tipo de resultados. Además nuestro sistema permite poder grabar y recuperar información holográfica de una manera sencilla, rápida, aleatoria y precisa. La idea es distribuir la información en una cara del cristal en forma de un arreglo bidimensional de puntos,

dicha distribución es realizada a través de la incorporación del sistema electrónico de posicionamiento que es descrito en el capítulo 5.

A manera de comparación y para mostrar la versatilidad de nuestro sistema se realizó primero la grabación de nueve imágenes en nueve puntos diferentes sobre película holográfica 10E75 de marca Agfa-Gevaert, y posteriormente se realizó la grabación de las nueve imágenes en nueve puntos sobre una de las caras de un cristal fotorrefractivo de Niobato de Litio.

Por lo pronto en este capítulo nos dedicaremos exclusivamente a la descripción de la arquitectura de nuestro sistema de una sola lente, en el capítulo 5 se da la descripción detallada del diseño y construcción del dispositivo electrónico de posicionamiento y en el capítulo 6 mostramos los resultados, es decir, mostramos las imágenes grabadas en la película y en el cristal, además de mostrar comparaciones de las imágenes recuperadas con respecto a las originales.

4.2 Descripción de la arquitectura del sistema propuesto

La parte principal de nuestro sistema de una sola lente se esquematiza en la figura 4.1, en donde se puede ver como la imagen real de una fuente puntual es formada por medio de una lente positiva de distancia focal f .

Cuando es colocada una transparencia entre la fuente puntual y la lente, en el plano de la imagen de la fuente lo que obtenemos es la transformada de Fourier de la transparencia y en un plano posterior a la lente se tiene la imagen aérea de la misma de tal manera que ésta puede ser captada por la cámara de CCD.

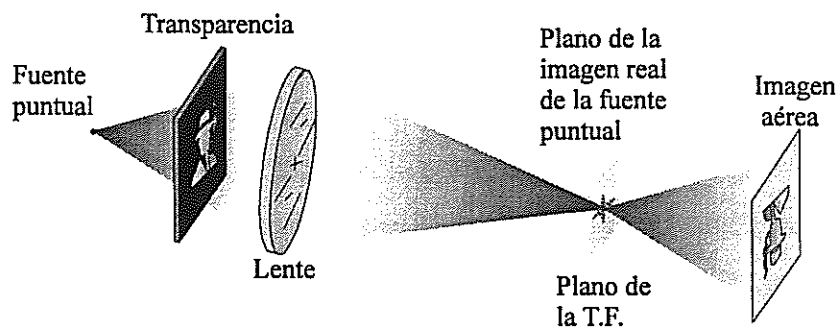


Figura 4.1 Parte principal del sistema propuesto de una sola lente.

En la figura 4.2 se muestra un diagrama esquemático de la arquitectura general de nuestro sistema óptico propuesto. Nótese que el haz de referencia no utiliza ningún elemento óptico adicional. Mientras que el haz objeto consta de un sistema formador de imágenes de una sola lente. Este sistema forma una imagen aérea del objeto a grabar en un plano posterior al plano en donde se coloca el material de grabado, el cual es colocado cerca del plano de convergencia de los haces.

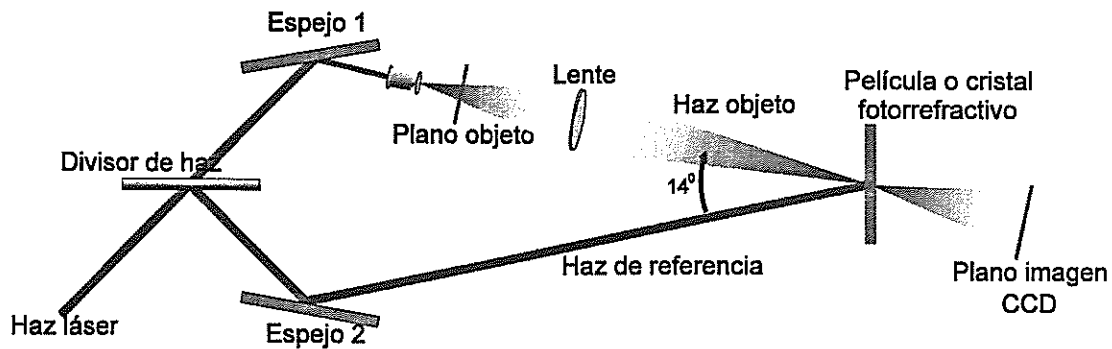


Figura 4.2. Arquitectura general del sistema óptico propuesto.

La posición del objeto y su imagen están determinados por la fórmula gaussiana:

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

En donde S_o es la distancia del objeto a la lente, S_i la distancia de la lente al plano de formación de imagen, y f la distancia focal de la lente. La ventaja principal de este sistema es que al momento de recuperar la información, la imagen del objeto se formará en el espacio y podrá ser leída por una cámara CCD sin lente. Esto simplifica y reduce los costos de nuestra Memoria Holográfica Dinámica. En la figura 4.3 se muestra a detalle el proceso de grabado y recuperación de la información holográfica, en donde cabe destacar que como ya se mencionó, la lente solamente es necesaria para el proceso de grabación, mientras que para el proceso de recuperación no es necesario mas que el mismo haz de referencia.

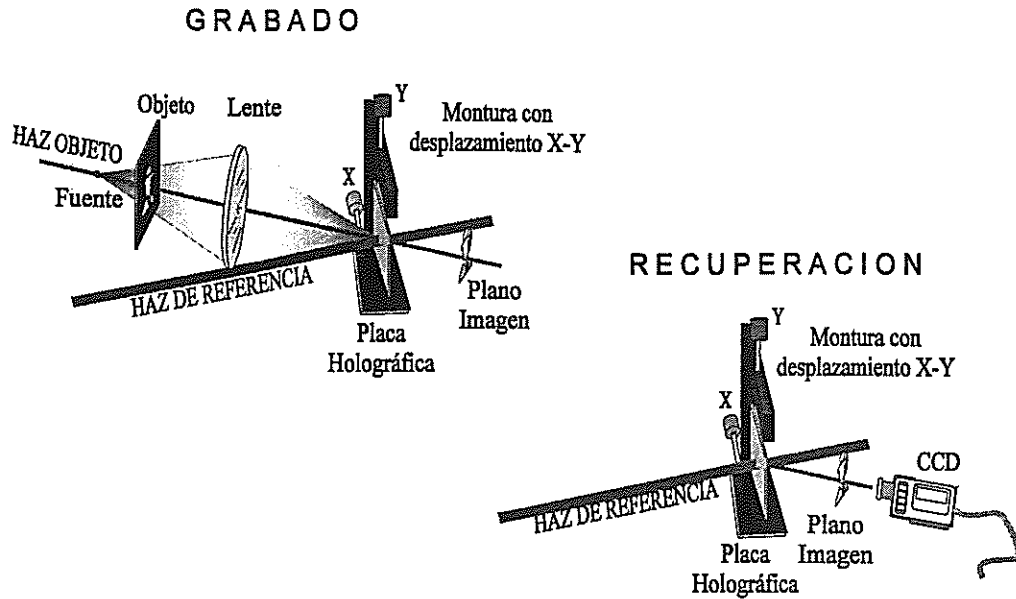


Figura 4.3. Procesos de grabado y recuperación de la información holográfica.

En la figura 4.3 también se puede observar que el dispositivo electrónico de posicionamiento es utilizado tanto en el proceso de grabado como en el de recuperación de la información holográfica. Como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo solamente es necesaria la distribución de la información en un arreglo bidimensional de puntos en un plano en el proceso de grabado y la recuperación de dicha información de una manera completamente aleatoria.

En nuestro sistema utilizamos transparencias binarias como objetos y lo que realmente estamos grabando son hologramas de la transformada de Fourier de las transparencias. Como nos interesa grabar en nueve puntos diferentes, utilizamos nueve transparencias con imágenes diferentes.

Como ya se había mencionado en el capítulo 2, los hologramas de la transformada de Fourier son por lo regular utilizados para el almacenamiento de información a grandes escalas debido a que el área en donde se graba el holograma es muy pequeña. Sin embargo, realizar la localización de los puntos en donde se grabó la información ya sea en la película o en el cristal fotorrefractivo, puede llegar a ser una tarea demasiado tediosa y lenta. Pensando en esto fue como se pensó en acoplar

un dispositivo electrónico con el cual se pudiera realizar dicha tarea de una manera rápida y precisa, utilizando como medio de control una computadora.

Como se puede ver, la arquitectura de nuestro sistema óptico propuesto es en realidad muy sencilla y debido a la incorporación del sistema electrónico de posicionamiento el proceso de grabado y obtención de la información holográfica es rápido y preciso.

En el siguiente capítulo damos la descripción detallada del sistema electrónico de posicionamiento, para pasar en el capítulo siguiente a la descripción de los resultados obtenidos en este trabajo.

REFERENCIAS

- [4.1] *METHOD FOR HOLOGRAPHIC STORAGE USING PERISTROPHIC MULTIPLEXING*; Kevin Curtis, Allen Pu, and Demetri Psaltis; Department of Electrical Engineering, California Institute of Technology; July 1, 1994/ Vol 19, No. 13/ OPTICS LETTERS; Optical Society of America.
- [4.2] *STORAGE OF 500 HIGH-RESOLUTION HOLOGRAMS IN A LiNbO₃ CRYSTAL*; F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll; Northrop Research and Technology Center, Palos Verdes Peninsula, California 90274; April 15, 1991/ Vol. 16, No.8/ OPTICS LETTERS; Optical Society of America.
- [4.3] *ANGLE-MULTIPLEXED STORAGE OF 5000 HOLOGAMS IN LITHIUM NIOBATE*; F. H. Mok; Optics Letters; Vol. 18, No. 11, 1993. c

CAPITULO 5

DISPOSITIVO ELECTRONICO DE POSICIONAMIENTO

5.1 Introducción

Los sistemas híbridos (ópticos y electrónicos) de procesamiento de información, entre otras aplicaciones están siendo desarrollados para poder armar las partes de lo que podría ser una computadora óptica^[5.1, 5.2]. Muchos de estos sistemas requieren el uso de sistemas de posicionado de precisión, sobre todo para poder manipular los elementos ópticos constitutivos. En los laboratorios experimentales de óptica se manejan monturas con tornillos micrométricos que por lo general son manejados de una manera manual.

Ya existen en el mercado dispositivos electrónicos para controlar estos tornillos, los cuales pueden ser adaptados fácilmente a las monturas. Sin embargo, el precio de este tipo de sistemas se encuentra entre mil y 3 mil dólares para controles manuales y hasta 7 mil dólares para controles programables. En el sistema óptico propuesto es importante diseñar y construir un sistema de control económico y con el cual podamos cubrir nuestras necesidades de rapidez y precisión en la localización de los puntos en los cuales se graba la información holográfica.

Para la realización de este dispositivo electrónico se utilizó un Dispositivo Lógico Programable (PLD) [5.3, 5.4, 5.5]. Los PLD's son circuitos integrados con los cuáles se puede realizar la implementación de funciones en forma de suma de productos a través de la incorporación de una tabla de verdad, con una programación adecuada de éstos.

La idea de utilizar PLD's en este trabajo, es debido a que por las características de estos dispositivos se evita la utilización de una gran cantidad de circuitos discretos que se requerirían al momento de armar el sistema. Otra opción viable es la de utilizar un microprocesador o un microcontrolador, sin embargo, estaríamos subutilizando la capacidad de este tipo de dispositivos.

El PLD es acoplado a motores de paso híbridos a través de sus respectivas etapas de potencia, por lo que es necesario grabar correctamente el dispositivo de tal manera que este genere las secuencias correctas de movimiento de los motores, para poder tener un control completo sobre estos. Los motores híbridos resultan de la superposición de los principios de los motores de reluctancia variable y de imán permanente [5.6, 5.7].

El sistema cuenta con un programa de computadora, el cual permite controlar a través de una PC las funciones que desempeña nuestro sistema, que entre las principales se encuentran las siguientes: control de secuencia de giro en dirección de las manecillas del reloj, control de secuencia de giro en dirección contraria al de las manecillas del reloj, control sobre la cantidad de giro del motor, control sobre la velocidad de giro del motor, etc. Además de que con el mismo programa se crea una ambientación amigable al usuario a través del monitor de la computadora, haciendo que el sistema sea muy fácil de manejar.

Con la misma idea general de este sistema se puede controlar un motor más con la misma computadora, abriendo la opción de poder realizar la localización de puntos en el espacio tridimensional.

A través de este capítulo daremos una descripción detallada de cómo se fue implementando nuestro dispositivo electrónico de posicionamiento.

5.2 Diagrama general a bloques del dispositivo

En la figura 5.1 se muestra el diagrama general a bloques del dispositivo, con el cuál se muestran todas y cada una de las partes que lo conforman. Los primeros dos bloques superiores nos indican que ya una vez que tenemos grabado el PLD, las señales de control serán generadas por medio de un programa de PC y obtenidas a través del puerto paralelo de la misma.

Los siguientes dos bloques nos indican que las salidas del PLD van directamente conectadas a una etapa de potencia, etapa que es necesaria para poder acoplar el PLD con los motores. El diagrama nos muestra dos bloques que indican etapas de potencia y dos bloques que indican motores de paso, esto es debido a que hay que recordar que el dispositivo es para la localización de puntos en un plano, por lo que es necesario tener movimiento en dos coordenadas X e Y, y cada motor se encarga del movimiento sobre una de ellas.

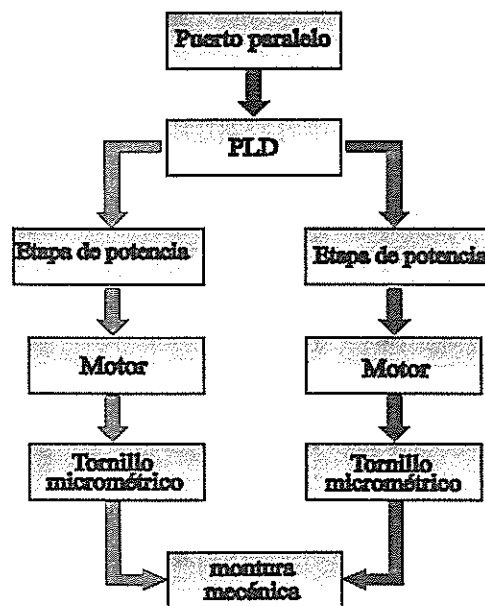


Figura 5.1 Diagrama general a bloques del dispositivo electrónico.

Los últimos bloques nos indican el acoplamiento de cada uno de los motores a uno de los tornillos micrométricos que se encuentran acoplados a una montura de desplazamiento.

En la siguiente sección se describirá la secuencia a seguir para llegar a la etapa de grabado del PLD para poder lograr nuestro objetivo.

5.3 Proceso de grabación del PLD

5.3.1 Diagrama a bloques

El primer paso fue el de dibujar un diagrama de bloques el cual refleja las funciones a desempeñar por el PLD que en nuestro sistema es el circuito integrado GAL-16V8. El diagrama se muestra en la figura 5.2.

La idea representada en el diagrama es la de grabar en el GAL dos bloques iguales, pero que pueden ser controlados independientemente. Cada bloque consta de

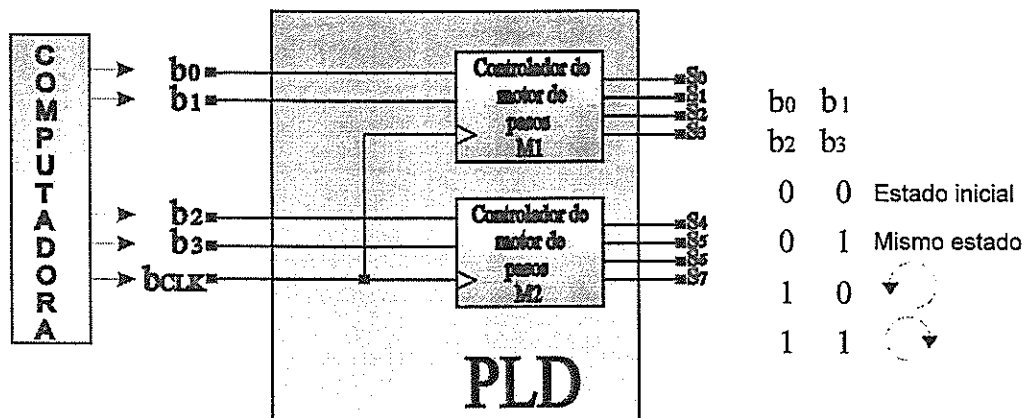


Figura 5.2 Diagrama de bloques de lo que se debe grabar en el PLD para poder controlar dos motores de paso.

dos señales de entrada de control y cuatro salidas con las cuales se generan las secuencias para que el eje del motor pueda girar tanto en la dirección de las manecillas del reloj como en la dirección contraria. Es decir, si $b1b0=11$ y se mandan pulsos de reloj, entonces el bloque estará generando la secuencia para que el eje del

motor gire en dirección de las manecillas del reloj. Si en lugar de eso $b1b0=10$ y se mandan pulsos de reloj, entonces el bloque deberá generar en sus salidas la secuencia para que el motor se mueva en dirección contraria al de las manecillas del reloj. Luego, si $b1b0=01$ y se mandan pulsos de reloj, entonces, el bloque deberá mantener sus salidas en el mismo estado en el que se encontraba antes de que le empezaran a llegar los pulsos de reloj. Ya por último, si $b1b0=00$, entonces, las salidas del bloque deben irse a su estado inicial.

5.3.2 Diagrama de estados

Una vez realizado el diagrama de bloques, el siguiente paso consiste en la elaboración de un diagrama de estados, sin embargo, para generar este diagrama fue necesario conocer primero las secuencias con las cuales los ejes de nuestros motores se mueven tanto en una dirección como en la otra. Estas secuencias se muestran en la figura 5.3.

		S3	S2	S1	S0
PASO	1	0	1	1	1
	2	1	0	1	1
	3	1	1	0	1
	4	1	1	1	0
	5	0	1	1	1

(a)

		S3	S2	S1	S0
PASO	1	1	1	1	0
	2	1	1	0	1
	3	1	0	1	1
	4	0	1	1	1
	5	1	1	1	0

(b)

Figura 5.3 (a) Secuencia de excitación para rotación en el sentido de las manecillas del reloj.

(b) Secuencia de excitación para rotación contraria al de las manecillas del reloj.

De la figura 5.3 podemos observar que solamente se necesitan cuatro estados diferentes en las salidas para poder generar movimiento en el eje del motor tanto en la dirección de las manecillas del reloj como en la contraria. A estos cuatro estados debemos agregar uno más el cual es el estado de inicio y al cual le hemos llamado el

estado inicial cero, por lo que en total necesitamos que las salidas varíen dentro de 5 estados diferentes.

Una vez que ya conocemos los estados en los que pueden estar cambiando las salidas, se procede a establecer las condiciones de paso de un estado a otro mediante un diagrama de estados el cual para nuestro propósito queda como se muestra en la figura 5.4.

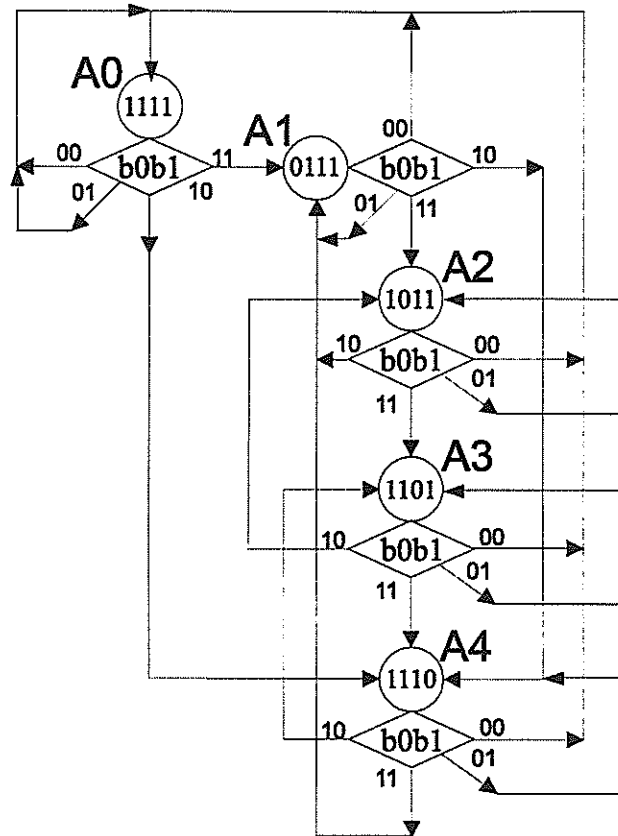


Figura 5.4 Diagrama de estados para controlar un motor de pasos.

Analicemos que es lo que pasa si una vez que activamos el sistema las salidas se encuentran en el estado inicial $A0=1111$. Tenemos cuatro opciones, la primera es que si $b1b0=11$ y llega un pulso de reloj, entonces, las salidas pasan al estado 0111. La segunda es que si $b1b0=10$ y llega un pulso de reloj, entonces, las salidas pasan al estado 1110. Las otras dos opciones son, una que si $b1b0=01$, entonces las salidas permanecen en el mismo estado, la otra es que si $b1b0=00$ y llega el pulso de reloj,

entonces, no importando en que estado se encuentren las salidas, estas inmediatamente pasen al estado inicial A0=1111. Esta pequeña descripción puede ser fácilmente observada en el diagrama de estados, solamente siguiendo la dirección de las flechas a partir del estado inicial A0. El siguiente paso es el de realizar una tabla de estados.

5.3.3 Tabla de estados

En la tabla de estados se encuentran tanto los estados permitidos como los no permitidos. Los estados permitidos son aquellos que sirven para nuestro propósito y que manejamos en nuestro diagrama de estados que en nuestro caso son cinco. Los no permitidos son aquellos que pueden ser generados por nuestro sistema cuando este es alimentado y que a nosotros no nos son útiles, pero es necesario tenerlos en cuenta para eliminar posibles errores. Nuestra tabla de estados se muestra en la figura 5.5.

VARIABLE DEL ESTADO	ESTADO PRESENTE S3 S2 S1 S0	ENTRADA b1 b0	ESTADO SIGUIENTE S3 S2 S1 S0	
A5	0 0 0 0	* *	1 1 1 1	A0
A6	0 0 0 1	* *	1 1 1 1	A0
A7	0 0 1 0	* *	1 1 1 1	A0
A8	0 0 1 1	* *	1 1 1 1	A0
A9	0 1 0 0	* *	1 1 1 1	A0
A10	0 1 0 1	* *	1 1 1 1	A0
A11	0 1 1 0	* *	1 1 1 1	A0
A1	0 1 1 1	0 0	1 1 1 1	A0
		0 1	0 1 1 1	A1
		1 0	1 1 1 0	A4
		1 1	1 0 1 1	A2
A12	1 0 0 0	* *	1 1 1 1	A0
A13	1 0 0 1	* *	1 1 1 1	A0
A14	1 0 1 0	* *	1 1 1 1	A0
A2	1 0 1 1	0 0	1 1 1 1	A0
		0 1	1 0 1 1	A2
		1 0	0 1 1 1	A1
		1 1	1 1 0 1	A3
A15	1 1 0 0	* *	1 1 1 1	A0
A3	1 1 0 1	0 0	1 1 1 1	A0
		0 1	1 1 0 1	A3
		1 0	1 0 1 1	A2
		1 1	1 1 1 0	A4
A4	1 1 1 0	0 0	1 1 1 1	A0
		0 1	1 1 1 0	A4
		1 0	1 1 0 1	A3
		1 1	0 1 1 1	A1
A0	1 1 1 1	0 0	1 1 1 1	A0
		0 1	1 1 1 1	A0
		1 0	1 1 1 0	A4
		1 1	0 1 1 1	A1

Figura 5.5 Tabla de estados permitidos y no permitidos.

El siguiente paso es el de pasar la tabla de estados a la forma de un programa en CUPL. CUPL es un paquete de programación de Texas Instruments con el cuál por medio de un formato ya establecido se pueden realizar programas de las tablas de

estado, esto con la finalidad de que el paquete cree un archivo con extensión .JED, el cuál sirve para poder programar el GAL con un Programador Universal ^[5.8].

Ya una vez que se ha programado el GAL, se verifica que este funcione correctamente. Hay que tener en cuenta que para poder controlar dos motores, es necesario grabar dos bloques completamente iguales en el mismo PLD, como se muestra en la figura 5.2. Para grabar los dos bloques en el mismo circuito, es necesario indicarlo en el programa que se elabora en CUPL después de la realización de la tabla de estados ^[5.9].

5.4 Generación de las señales de control

De acuerdo con el diagrama de la figura 5.2, se necesitan en total cinco señales de entrada, una señal de reloj que es común a los dos bloques, y otras cuatro señales de las cuales dos sirven para controlar uno de los motores y las otras dos para el control del otro motor. Estas señales se generaron por medio de un programa de computadora y son obtenidas a través del puerto paralelo de la misma.

El puerto paralelo de la PC tiene 8 bits de salida, nosotros utilizamos el bit menos significativo de estos 8 bits para generar el pulso de reloj del PLD, esto se hizo haciendo oscilar este bit entre 0 y 1 de una manera periódica por medio del programa, de tal manera que podemos controlar el número de pulsos y la velocidad de los mismos. Con los siguientes 4 bits del puerto se generan las otras cuatro señales de control, de tal manera que podemos generar y manipular estas cinco señales a nuestra conveniencia, teniendo así un completo control en el movimiento de los dos motores de paso ^[5.9].

4.5 Acoplamiento del PLD a las etapas de potencia

Ya una vez que se había comprobado que el acoplamiento entre la computadora y el PLD funcionaba como se esperaba, el siguiente paso fue el de

acoplar el PLD con los motores de paso. Este acoplamiento no se puede hacer de una manera directa debido a que el PLD no cumple con las características eléctricas requeridas de voltaje y corriente de los motores de paso. Para realizar tal acoplamiento fue necesario acoplar entre cada una de las salidas del PLD y las entradas de los motores una etapa de potencia. Estas etapas sirven para acondicionar las diferencias eléctricas de voltaje y corriente existentes entre el PLD y los motores [5.9]. La figura 5.6 nos muestra el diagrama eléctrico completo del acoplamiento desde el puerto paralelo de la PC hasta los motores de paso. Hay que destacar que el circuito integrado 74LS245 sirve para protección de la PC.

micrométricos de la montura. En nuestro caso el acoplamiento se hizo a una montura de desplazamiento de 5 grados de libertad de los cuales son tres para desplazamientos en X, Y y Z y dos para movimientos circulares parciales sobre dos de los ejes, por lo que los dos motores se acoplaron a los tornillos micrométricos a los que corresponden los desplazamientos en X e Y.

Para el acoplamiento de los motores a los tornillos micrométricos, fue necesaria la incorporación de algunas piezas metálicas, estas piezas metálicas pueden ser removidas fácilmente de la montura, de tal manera que la localización de los puntos se puede hacer en determinado momento si así se desea de una manera completamente manual y no a través del dispositivo electrónico. En la figura 5.7 se muestran los motores acoplados a la montura y en la figura 5.8 se muestra el sistema de posicionamiento completo, aunque no en su etapa final.

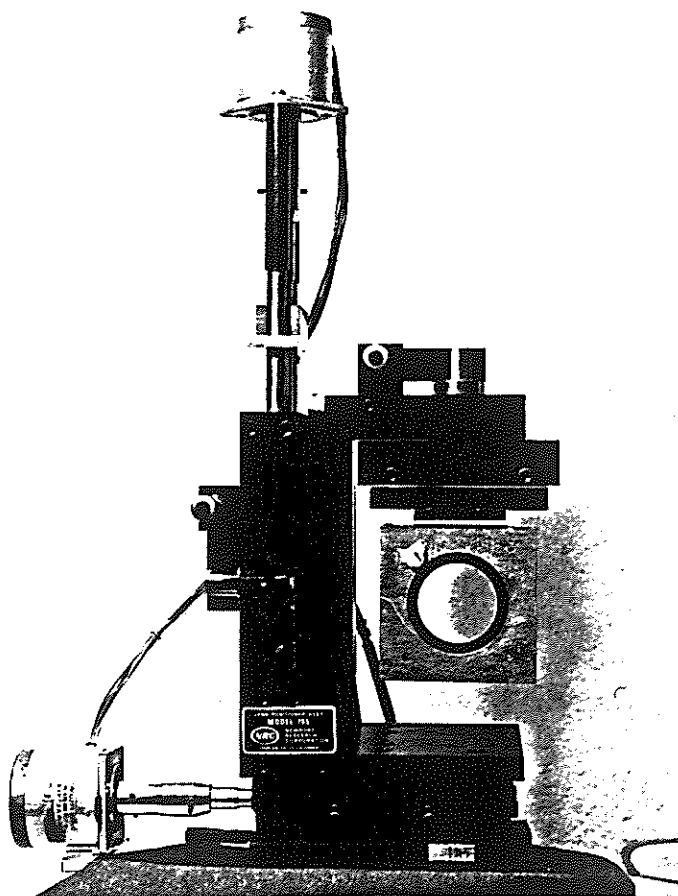


Figura 5.7 Acoplamiento de los motores de paso a la montura.

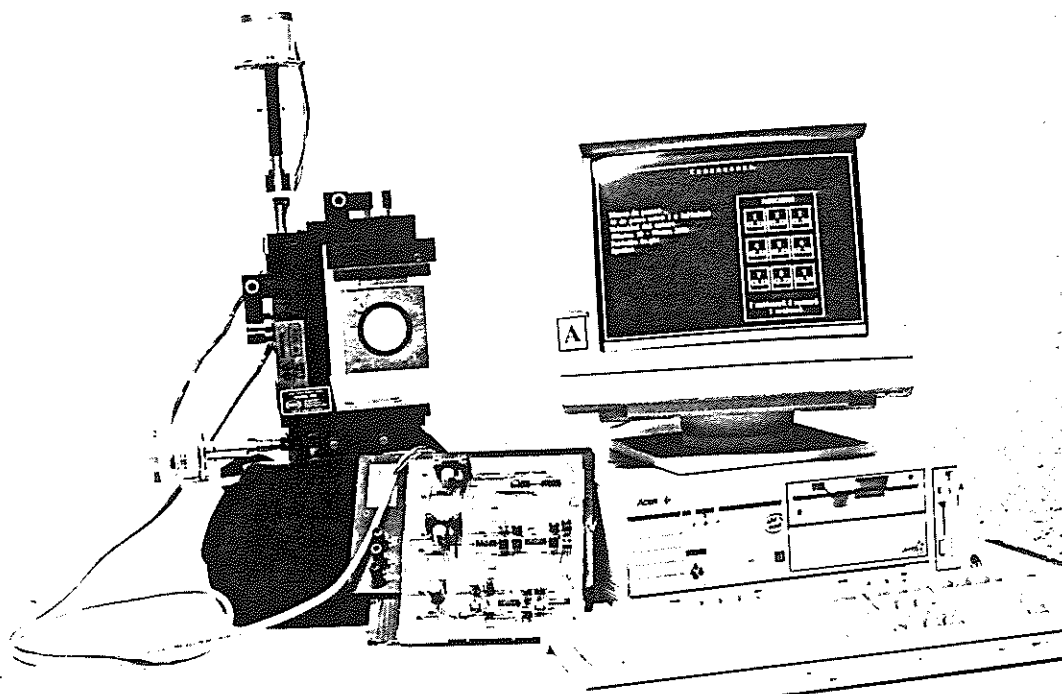


Figura 5.8 Sistema de posicionamiento completo.

Debido que el dispositivo debe ser cambiado de un lugar a otro en el laboratorio, fue necesaria la elaboración del circuito impreso y la colocación del mismo en una caja, de tal manera que este pudiera ser transportado fácilmente, en la figura 5.9 se muestra la parte electrónica del sistema en su etapa final de presentación. Como ya se había mencionado anteriormente el dispositivo debe ser manejado fácilmente por cualquier usuario por lo que la ambientación en pantalla en la computadora debe ser amigable. En la figura 5.10 se muestra la ambientación en pantalla para un fácil control del usuario en donde se puede observar que se maneja por el momento solamente la localización de 9 puntos. Ya por último en la figura 5.11 se muestra el sistema completo en su etapa final.

5.7 Características generales del montaje experimental

Los motores de paso que utilizamos en nuestro dispositivo son motores de paso híbridos de la marca CROUZET. Estos motores son de 200 pasos por vuelta, es

decir, su ángulo de paso es de 1.8 grados por paso. Cada motor realiza un consumo de corriente de aproximadamente 151 mA por fase y necesita un voltaje de alimentación de 12 volts. El consumo total de corriente del dispositivo es de aproximadamente 600 mA.

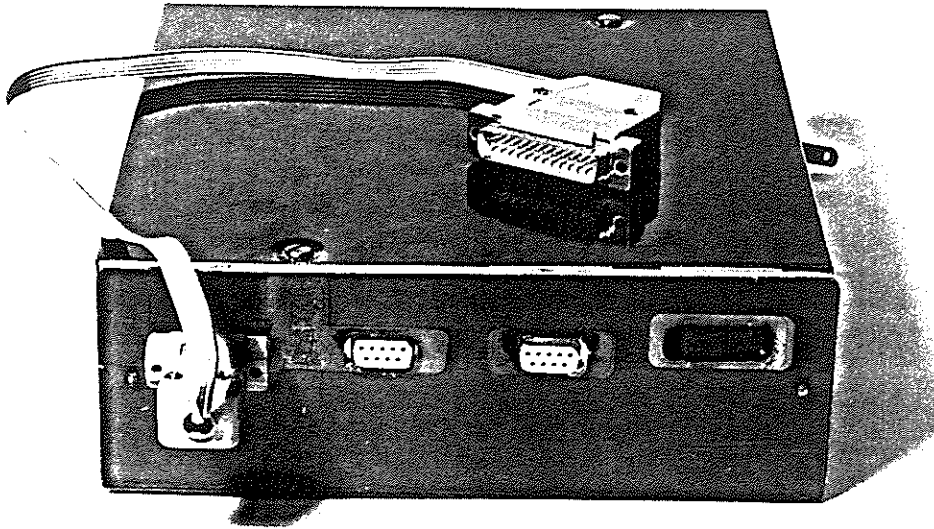


Figura 5.9 Parte electrónica del sistema en su etapa final.

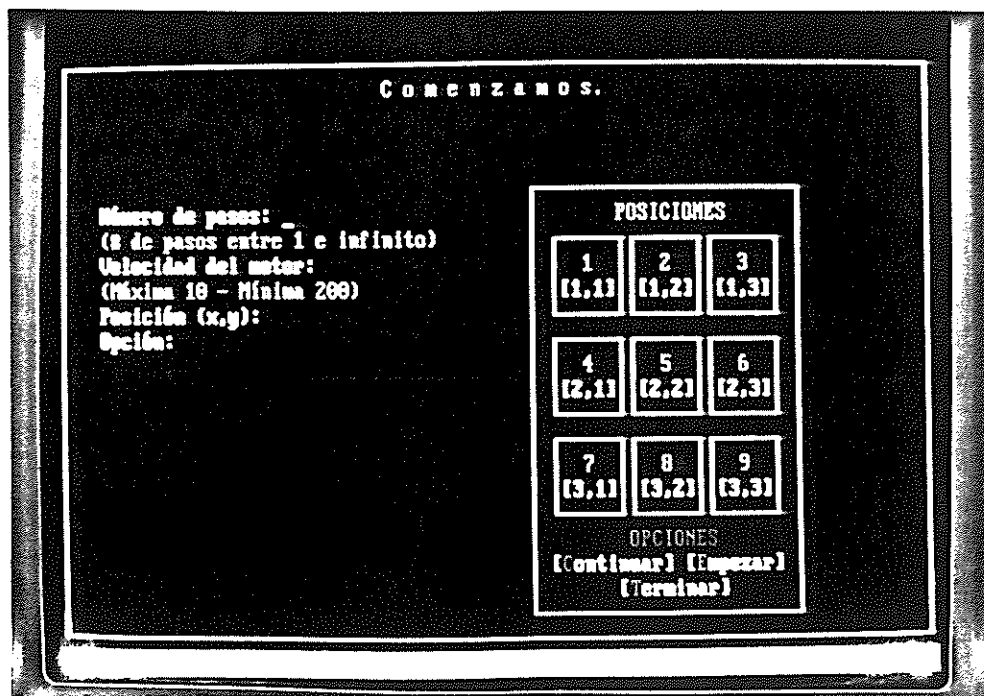


Figura 5.10 Ambientación final en pantalla.



Figura 5.11 Sistema de posicionamiento en su etapa final

Los motores fueron acoplados a una montura de la marca Newport Research Corporation, que como ya se había mencionado es una montura de 5 grados de libertad, tres de los cuales son para movimientos lineales y dos para movimientos circulares. Esta montura tiene tornillos micrométricos con la mínima resolución de 10 micras, por lo que el mínimo movimiento que se puede realizar con los motores ya acoplados a estos tornillos es de 2.5 micras por paso. El programa de control es de fácil manejo, ya que tiene una ambientación en pantalla con la cual el usuario fácilmente puede cambiar la velocidad y el tamaño de paso de los motores; por el momento solamente nos interesa realizar la localización de nueve puntos de una manera completamente aleatoria, por lo que con la ambientación en pantalla realizada con el programa solamente se pueden localizar nueve puntos. Para poder localizar mas puntos, deben hacerse modificaciones al programa.

Otra característica importante es que el torque de los motores disminuye con la velocidad, por lo tanto, para que el motor pueda hacer girar los tornillos en la montura, la frecuencia máxima del pulso de reloj debe de ser de 100 Hz ($T=10$ ms), es decir, con nuestro dispositivo se puede avanzar 1 mm cada 4 segundos.

Fácilmente se puede realizar la incorporación de un motor de pasos más, pudiendo tener control sobre la localización de puntos en tres dimensiones, esto con el respectivo acoplamiento del motor al tercer tornillo micrométrico con el que se realizan los movimientos en Z.

Ya en el capítulo anterior se mostró la parte en la que es incorporado el sistema electrónico de posicionamiento a la arquitectura general de nuestro sistema óptico de una sola lente. En los capítulos siguientes se mostrará todo el sistema óptico completo así como los resultados experimentales obtenidos con el sistema.

REFERENCIAS

- [5.1] *OPTICAL SIGNAL PROCESSING COMPUTING AND NEURAL NETWORKS*; Francis T. S. Yu, Suganda Jutamulia; Ed. Wiley Interscience, 1992.
- [5.2] *ENGINEERING OPTICS*; Keigo Iisuka; Springer Series in Optical Sciences, Volume 35.
- [5.3] *DIGITAL DESIGNING WITH PROGRAMMABLE LOGIC DEVICES*; John W. Carter, University of North Carolina, Charlotte; Prentice Hall.
- [5.4] *DIGITAL SYSTEM DESIGN USING PROGRAMMABLE LOGIC DEVICES*; Parag K. Lala; Prentice Hall.
- [5.5] *DIGITAL SYSTEMS DESIGN WITH PROGRAMMABLE LOGIC*; Martin Blton; University of Bristol; Addison-Wesley Publishing Company.
- [5.6] *STEPPING MOTORS: A GUIDE TO MODERN THEORY AND PRACTICE*; P. P. Acarnley; IEE Control Engineering Series.
- [5.7] *INCREMENTAL MOTION CONTROL – STEP MOTORS AND CONTROL SYSTEMS*; Benjamin C. Kuo, University of Illinois at Urbana Champaign; SRL Publishing Company; Volume II.
- [5.8] *STARTER KIT MANUAL*; Logical devices Inc.; Texas Instruments.
- [5.9] *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA POSICIONADOR DE CRISTALES FOTORREFRACTIVOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE INFORMACION HOLOGRAFICA*; Tesis Profesional que para obtener el Título de ‘Licenciado en Electrónica’ presentó: Marcos Antonio Plata Sánchez; Asesores: M. C. Edwin Mejía Motta y Dr. Eduardo Tepichín R.; INAOE, Tonantzintla, Pue..

CAPITULO 6

RESULTADOS

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en este trabajo organizados de la siguiente manera: primero se muestra el diagrama esquemático del sistema óptico completo con los elementos ópticos que lo conforman.

En segundo lugar se muestran las imágenes obtenidas a través de la CCD cuando se lleva el proceso de recuperación del frente de onda de las transparencias, cuando el proceso de grabado fue llevado a cabo en película 10E75, además de mencionar los parámetros que son necesarios para este proceso de grabado.

Posteriormente se muestran imágenes nuevamente obtenidas a través de la CCD, en el proceso de reconstrucción del frente de onda, solo que con la diferencia de que ahora el proceso de grabado fue llevado a cabo en una cristal fotorrefractivo de Niobato de Litio, nuevamente damos los parámetros utilizados en el sistema para llevar a cabo el proceso de grabado. En esta parte primero se muestran imágenes en donde el proceso de grabado es llevado a acabo cuando la polarización de los haces de referencia y objeto son perpendiculares al eje rápido del cristal fotorrefractivo. Y posteriormente se muestran imágenes en donde el proceso de grabado es llevado a cabo cuando la polarización de los haces de referencia y objeto son paralelos al eje rápido del cristal.

Además en cada una de las tres partes se hace una comparación de las imágenes obtenidas cuando es reconstruido el frente de onda, con las imágenes reales de las transparencias.

6.2 Sistema óptico completo

En la figura 6.1 se muestra un diagrama esquemático del sistema óptico completo con los componentes ópticos que lo conforman.

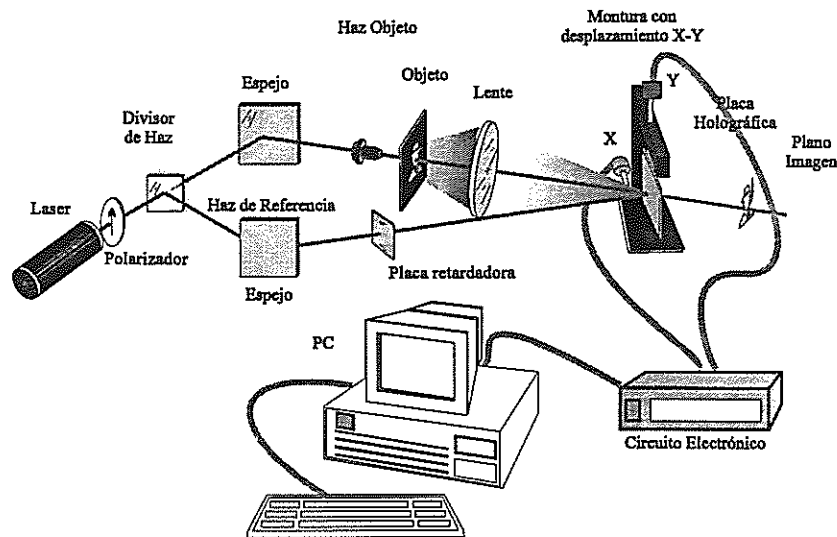


Figura 6.1 Diagrama esquemático del sistema óptico propuesto.

El polarizador y la placa retardadora sirven para garantizar que en el cristal llega la luz polarizada como se desea, ya sea horizontal o vertical, es decir, son para ajuste. Para cambiar la polarización de horizontal a vertical y viceversa, se gira el láser 90 grados. Por facilidad de alineación el cristal fue colocado de tal manera que su eje rápido siempre fuera paralelo al plano de la mesa, de tal manera que cuando incide luz polarizada verticalmente tenemos que la polarización de la luz y el eje del cristal están perpendiculares y cuando incide luz polarizada horizontalmente, la polarización de la luz y el eje del cristal se encuentran paralelos.

Una vez armado nuestro sistema se procedió al proceso de grabado y reconstrucción del frente de onda de las imágenes, primero en película 10E75 y posteriormente en el cristal fotorrefractivo.

Para el proceso de grabado en película 10E75 se colocó la lente a una distancia de 50 cm con respecto del pin-hole y del plano de incidencia en la película, es decir tenemos un sistema 2f. Las transparencias fueron colocadas a una distancia de 43.5 cm con respecto de la lente, por lo que la imagen posterior con respecto a la lente se forma nuevamente a una distancia de 58.78 cm, y es aquí en donde se colocó la cámara CCD. Para realizar este proceso de grabado satisfactoriamente se debe de ajustar el sistema de tal manera que se tenga una relación de intensidades de 1 a 1 entre el haz de referencia y el haz objeto. Para lograr esto de una manera aproximada fue necesario realizar el grabado de los hologramas no en el plano exacto de la transformada de Fourier de la transparencia, si no en un plano anterior, de tal manera que el área de grabado fuera aproximadamente el área del haz láser.

Cada objeto se grabó en un arreglo bidimensional de puntos en un área aproximada de un centímetro cuadrado. Como ya se ha mencionado anteriormente el dispositivo electrónico de posicionamiento hace eficiente la distribución de la información así como la recuperación de dicha información de una manera rápida y precisa. Los resultados obtenidos al realizar el proceso de reconstrucción de los frentes de onda se muestran en la figura 6.2, que nos muestra 9 imágenes obtenidas al recuperar los frentes de onda de las imágenes originales grabados en la película. Cabe mencionar que las imágenes mostradas en la figura 6.2 se encuentran con realce de borde. Dicho realce es logrado debido a las intensidades de grabado y rango dinámico de la película, ya que esto permite que solamente las frecuencias altas en el proceso de recuperación de la información sean observadas. Esto mismo no sucede con el material fotorrefractivo debido a que sus características físicas no son iguales a las de la película holográfica.

En la figura 6.3 se muestra la comparación de tres imágenes originales con las obtenidas con los hologramas de película.

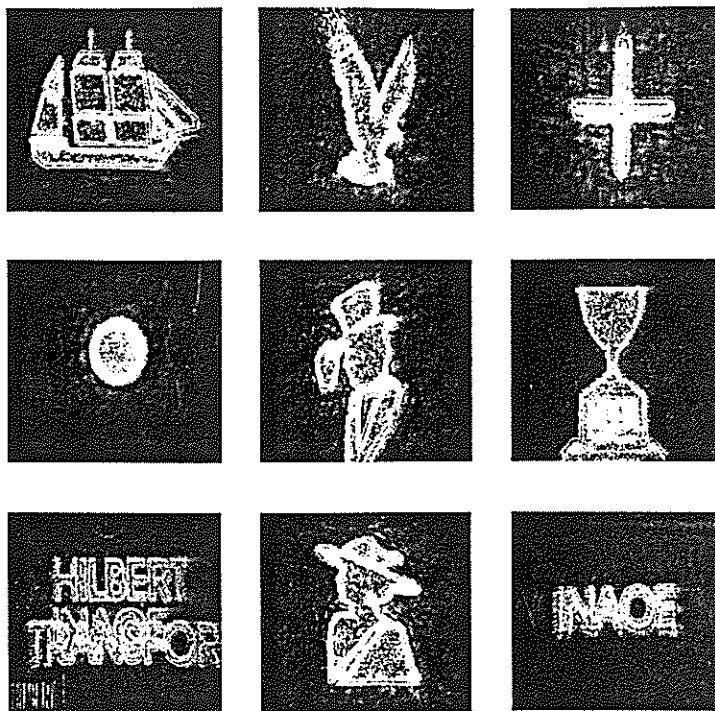


Figura 6.2 Imágenes obtenidas con los hologramas en película 10E75.

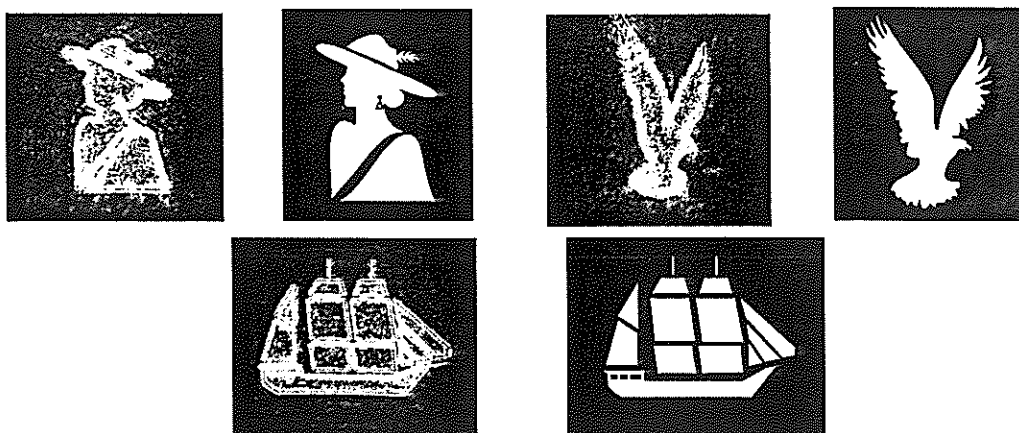


Figura 6.3 Comparación de tres imágenes originales con las obtenidas con los hologramas en película.

Una vez que obtuvimos resultados satisfactorios del grabado y recuperación de la información holográfica en la película, se procedió a realizar el proceso de grabado y reconstrucción de información holográfica en el cristal fotorrefractivo.

El cristal, como ya se había mencionado es colocado en la montura de tal forma que el eje rápido del mismo se encuentre paralelo al plano de la mesa holográfica. Una vez colocado el cristal se procedió a verificar la polarización de los haces de referencia y objeto en el plano de incidencia en el cristal, de tal manera que primero este fuera perpendicular al eje rápido. En seguida se procedió a la realización de una serie de pruebas para el grabado de los hologramas en el cristal, estas pruebas fueron hechas con diferentes tiempos de exposición y diferentes potencias por parte de los haces objeto y de referencia, esto con la finalidad de tratar de obtener los mejores resultados con la mejor eficiencia en los hologramas. Cabe destacar que como las imágenes son diferentes tanto en tamaño como en forma, es necesario estar variando las potencias de referencia y objeto en un plano de incidencia cercana al plano del cristal.

En la figura 6.4 mostramos las 9 imágenes obtenidas con los hologramas cuando la polarización de los haces es perpendicular al eje rápido del cristal y en la figura 6.5 nuevamente se hace una comparación de tres imágenes obtenidas con los hologramas y las imágenes originales.

En este caso, las imágenes se presentan sin realce de borde. Por otro lado, las imágenes aparecen con baja eficiencia debido al ángulo entre la polarización de los haces con el eje rápido del cristal. Se espera que si se cambia dicho ángulo de tal manera que la polarización de los haces sea paralela al eje del cristal, la eficiencia de las imágenes aumente. Los tiempos de exposición para el grabado de los hologramas en la figura 6.4 varía de 1 a 3.5 minutos, dependiendo de la figura.

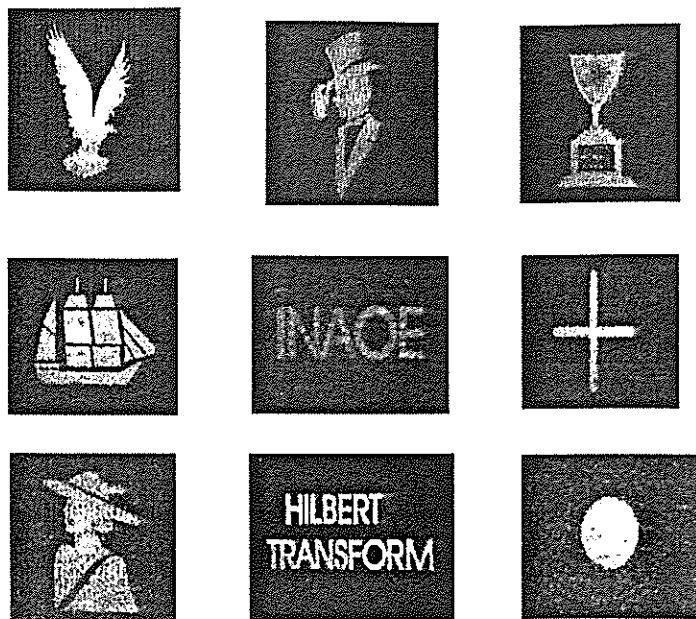


Figura 6.4 Imágenes obtenidas cuando la polarización de los haces es perpendicular al eje del cristal.

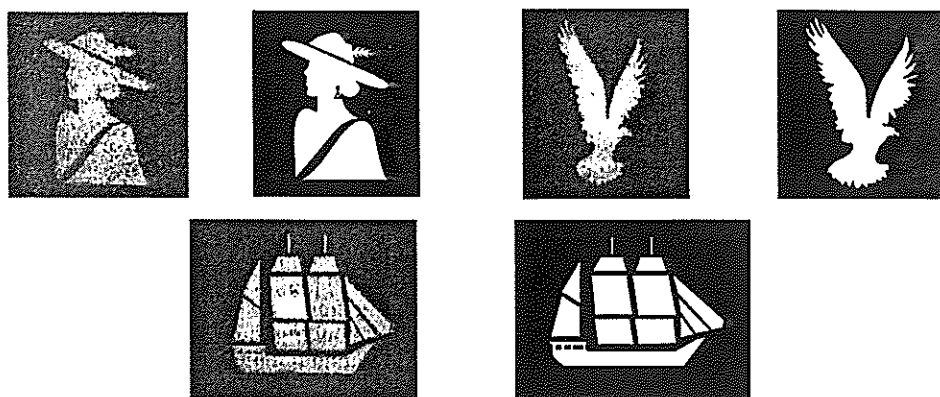


Figura 6.5 Comparación de imágenes originales con la de los hologramas cuando la polarización de los haces es perpendicular al eje del cristal.

A continuación en la figura 6.6 se muestran las 9 imágenes que se obtuvieron una vez que en el sistema se hace que la polarización de los haces de referencia y objeto sean paralelos al eje rápido del cristal. Una vez que se ha hecho esto, se procedió a realizar una nueva serie de pruebas con el fin de encontrar el tiempo de exposición y la potencia de los haces para poder obtener la mejor resolución en el proceso de reconstrucción de los hologramas.

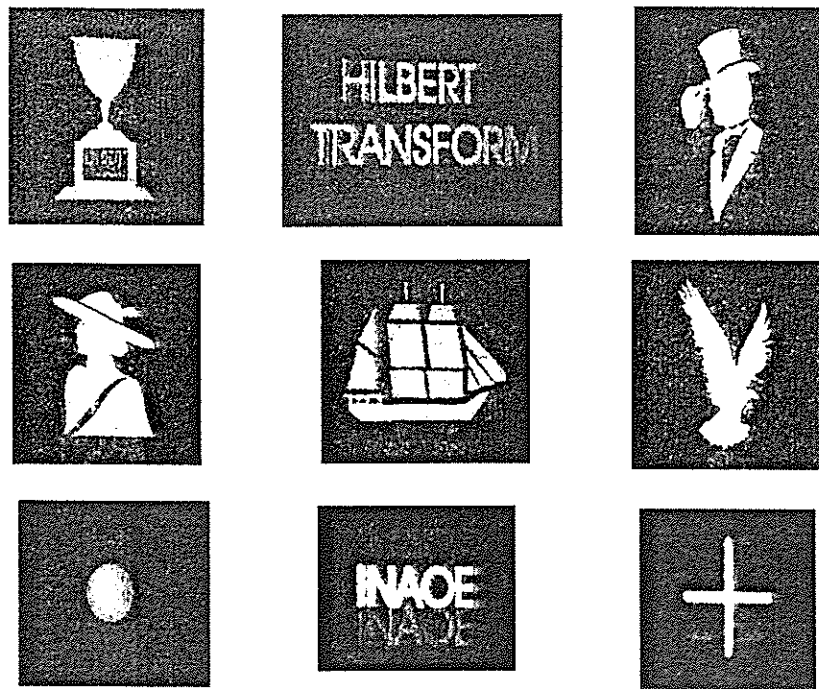


Figura 6.6 Imágenes obtenidas de los hologramas grabados en el cristal, cuando la polarización de los haces es paralela al eje del cristal.

En la figura 6.7 se muestra nuevamente la comparación de 4 de las imágenes de la figura 6.6 con las imágenes originales. Obsérvese que la eficiencia de difracción en las imágenes mejora respecto a las imágenes obtenidas cuando la polarización de los haces es perpendicular al eje rápido del cristal (ver figura 6.4), además cabe

mencionar que el rango en el tiempo de grabado disminuye un 35 % aproximadamente.

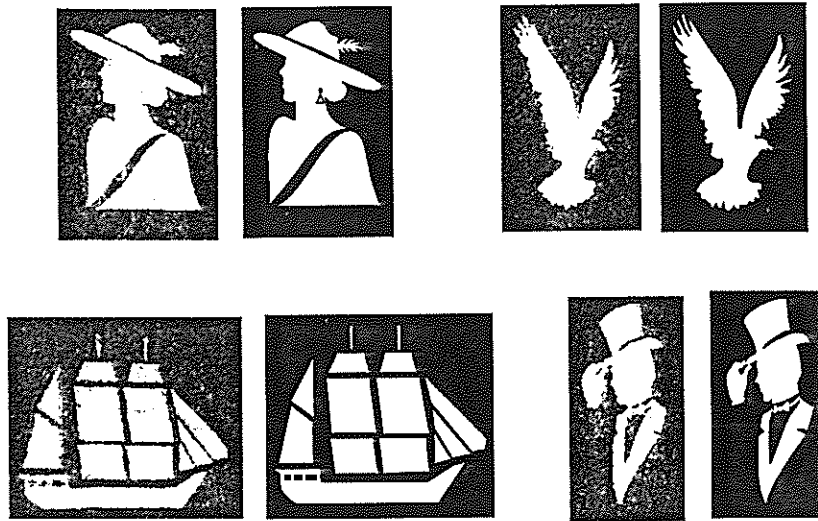


Figura 6.7 Comparación de 4 imágenes originales con las obtenidas con hologramas grabados en el cristal fotorrefractivo, cuando la polarización de los haces y el eje del cristal son paralelos.

Aunque está fuera del alcance de esta tesis, queremos destacar que es posible obtener un realce de borde en las imágenes obtenidas con los hologramas grabados en el cristal fotorrefractivo. En la figura 6.8 se muestran algunas imágenes reconstruidas con realce de borde para algunos de los objetos mostrados en las figuras anteriores.

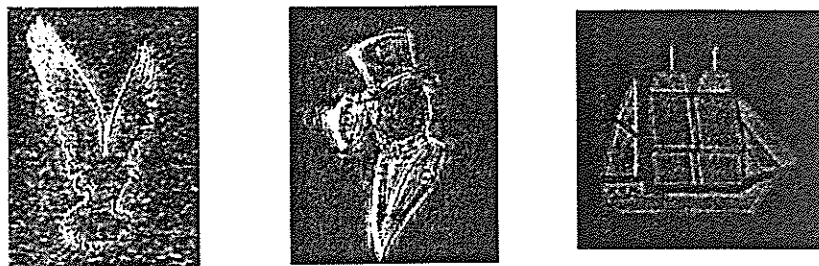


Figura 6.8 Imágenes con realce de borde recuperadas de hologramas grabados en el cristal fotorrefractivo.

En el capítulo siguiente damos las conclusiones a las que se llegaron durante el proceso de realización de este trabajo, así como las posibles extensiones del mismo en cada una de las etapas que lo conforman, es decir, la parte óptica, la electrónica, y la parte de control a través de la computadora.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

Se presentó el prototipo de un sistema óptico de una sola lente con el cual se pudo llevar a cabo el proceso de grabado, lectura y borrado de información holográfica en forma dinámica. Esta memoria holográfica dinámica consta básicamente de dos partes.

La primera y más importante consistió de un sistema óptico basado en la arquitectura de una sola lente que permitió llevar a cabo el proceso de grabado de hologramas en un cristal fotorrefractivo sin necesidad de más elementos ópticos, además de que para el proceso de reconstrucción no fue necesario mas que el mismo haz de referencia.

La segunda parte de este sistema consistió en el diseño y construcción de un dispositivo electrónico de posicionamiento con el que se pudo llevar a cabo la localización de puntos en una matriz bidimensional de tres por tres sobre una de las caras del cristal fotorrefractivo de una manera completamente aleatoria y repetitiva. Para este dispositivo electrónico de posicionamiento se utilizaron Dispositivos Lógicos Programables (PLD's) acoplados a motores de paso. La localización de dichos puntos fue controlada por medio de una computadora mediante la realización de un programa, con el cual también se lleva a cabo el proceso de una ambientación

en la pantalla de la computadora amigable al usuario. Además dentro de las ventajas del dispositivo de posicionamiento se pueden mencionar las siguientes: se puede controlar la velocidad de posicionamiento, se puede variar la distancia entre puntos con un mínimo de resolución de 2.5 micras, las señales de control son tomadas del puerto paralelo de la computadora lo que hace que el sistema sea portátil.

Se presentaron resultados experimentales del buen desempeño de nuestro sistema, en donde se muestran las imágenes recuperadas de los hologramas grabados en película 10E75 y el cristal fotorrefractivo. Las imágenes obtenidas en el proceso de recuperación de los hologramas grabados en película se muestran con realce de borde, dicho realce de borde es logrado con los parámetros adecuados, es decir las apropiadas intensidades de grabado relacionadas con el rango dinámico de la película. Las imágenes obtenidas en el proceso de recuperación de los hologramas grabados en el cristal fotorrefractivo son, primero cuando la polarización de los haces es perpendicular al eje rápido del cristal, y posteriormente cuando es paralela al eje rápido del cristal, de estos resultados se pudo observar que la mejor calidad de las imágenes se obtiene en el segundo caso, que es cuando la polarización de los haces es paralela al eje rápido del cristal. Por último se muestran algunas imágenes con realce de borde obtenidas de hologramas grabados en el cristal, aunque la explicación de esto no se encuentra dentro del alcance de este trabajo.

El trabajo puede ser ampliado de la siguiente manera. Primero, ya que hemos comprobado el buen desempeño del sistema óptico propuesto de una sola lente, el paso a seguir es el de grabar grandes cantidades de información con buena resolución. Con el dispositivo electrónico, mediante la incorporación en la tarjeta de algunos circuitos integrados, se pueden llegar a controlar hasta tres motores de paso sin que el sistema sufra alguna modificación de importancia. El programa de control de la computadora puede ser modificado para aumentar el número de puntos a ser localizados mediante el dispositivo electrónico de posicionamiento.

LISTA DE FIGURAS

	PAGINA
Figura 2.1 Ilustración gráfica del proceso fotográfico	9
Figura 2.2 Ilustración gráfica del proceso de grabado holográfico	10
Figura 2.3 Grabado Interferométrico	11
Figura 2.4 Reconstrucción del frente de onda con.....	13
Figura 2.5 Interferencia entre dos ondas planas	14
Figura 2.6 Reconstrucción a partir de la difracción de una onda plana	15
Figura 2.7 Reconstrucción de la imagen virtual de un objeto	16
Figura 2.8 Reconstrucción de la imagen real pseudoscópica	17
Figura 3.1 Diagrama de niveles de energía de LiNbO_3 que.....	23
Figura 3.2 Respuesta de un material fotorrefractivo a un	27
Figura 4.1 Parte principal del sistema propuesto de una sola lente	30
Figura 4.2 Arquitectura general del sistema óptico propuesto	31
Figura 4.3 Procesos de grabado y recuperación de la información.....	32
Figura 5.1 Diagrama general a bloques del dispositivo electrónico	36
Figura 5.2 Diagrama de bloques de lo que se debe grabar en el.....	37
Figura 5.3 Secuencias de excitación en el sentido de las	38
Figura 5.4 Diagrama de estados para controlar un motor de pasos	39
Figura 5.5 Tabla de estados permitidos y no permitidos	40
Figura 5.6 Diagrama eléctrico completo del dispositivo	42
Figura 5.7 Acoplamiento de los motores de paso a la montura	43
Figura 5.8 Sistema de posicionamiento completo	44
Figura 5.9 Parte electrónica del sistema en su etapa final	45
Figura 5.10 Ambientación final en pantalla	45
Figura 5.11 Sistema de posicionamiento en su etapa final	46
Figura 6.1 Diagrama esquemático del sistema óptico propuesto	50
Figura 6.2 Imágenes obtenidas con los hologramas en película.....	52
Figura 6.3 Comparación de tres imágenes originales con las.....	52

Figura 6.4	Imágenes obtenidas cuando la polarización de los.....	54
Figura 6.5	Comparación de imágenes originales con la de los.....	54
Figura 6.6	Imágenes obtenidas de los hologramas grabados en.....	55
Figura 6.7	Comparación de cuatro imágenes originales con.....	56
Figura 6.8	Imágenes con realce de borde recuperadas de.....	56

REFERENCIAS

- 1.- *OPTICA*; Eugene Hecht, Alfred Zajac, Adelphi University; Fondo educativo Interamericano, 1986.
- 2.- *OPTICAL HOLOGRAPHY*, Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin; Academic Press, 1971.
- 3.- *FUNDAMENTALS OF FOTONICS*; B. E. A. Saleh y M. C. Teich; Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- 4.- *METHOD FOR HOLOGRAPHIC STORAGE USING PERISTROPHIC MULTIPLEXING*; Kevin Curtis, Allen Pu, and Demetri Psaltis; Department of Electrical Engineering, California Institute of Technology; July 1, 1994/ Vol 19, No. 13/ OPTICS LETTERS; Optical Society of America.
- 5.- *STORAGE OF 500 HIGH-RESOLUTION HOLOGRAMS IN A LiNbO₃ CRYSTAL*; F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll; Northrop Research and Technology Center, Palos Verdes Península, California 90274; April 15, 1991/ Vol. 16, No.8/ OPTICS LETTERS; Optical Society of America.
- 6.- *ANGLE-MULTIPLEXED STORAGE OF 5000 HOLOGAMS IN LITHIUM NIOBATE*; F. H. Mok; Optics Letters; Vol. 18, No. 11, 1993.
- 7.- *HOLOGRAPHY AN ITS APPLICATION*; Yu. I. Ostrovsky, Mir Publishers, Moscow.
- 8.- *ENGINEERING OPTICS*; Keigo Iizuka; Springer Series in Optical Sciences, Volume 35.
- 9.- *OPTOELECTRONICA*; J. Watson; Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores.
- 10.- *INTRODUCTION TO FOURIER OPTICS*; Joseph W. Goodman, The McGraw-Hill Companies, Inc. 1996.
- 11.- *ELECTROMAGNETICS AND OPTICS*; E. E. Kriezis, D.P. Chrissoulidis & A.G. Papagiannakis; World Cientific. 1992.
- 12.- *PRINCIPLES OF HOLOGRAPHY*; Howard M Smith; Wiley-Interscience, A Division of John Wiley & Sons.
- 13.- *NONLINEAR OPTICS OF ORGANIC MOLECULES AND POLYMERS*; Edited by Hari Singh Nalwa, Seizo Miyata; CRC Press, 1997.
- 14.- *INTRODUCTION TO PHOTOREFRACTIVE NONLINEAR OPTICS*; Pochi Yeh; A Wiley-Interscience Publication;1993.
- 15.- *FUNDAMENTALS OF FOTONICS*; B. E. A. Saleh y M. C. Teich; Ed. John Wiley & Sons, Inc.,1991.
- 16.- *DIGITAL DESIGNING WITH PROGRAMMABLE LOGIC DEVICES*; John W. Carter, University of North Carolina, Charlotte; Prentice Hall.
- 17.- *DIGITAL SYSTEM DESIGN USING PROGRAMMABLE LOGIC DEVICES*; Parag K. Lala; Prentice Hall.

- 18.- *DIGITAL SYSTEMS DESIGN WITH PROGRAMMABLE LOGIC*; Martin Blton; University of Bristol; Addison-Wesley Publishing Company.
- 19.- *STEPPING MOTORS: A GUIDE TO MODERN THEORY AND PRACTICE*; P. P. Acarnley; IEE Control Engineering Series.
- 20.- *INCREMENTAL MOTION CONTROL – STEP MOTORS AND CONTROL SYSTEMS*; Benjamin C. Kuo, University of Illinois at Urbana Champaign; SRL Publishing Company; Volume II.
- 21.- *STARTER KIT MANUAL*; Logical devices Inc.; Texas Instruments.
- 22.- *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA POSICIONADOR DE CRISTALES FOTORREFRACTIVOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE INFORMACION HOLOGRAFICA*; Tesis Profesional que para obtener el Título de ‘Licenciado en Electrónica’ presentó: Marcos Antonio Plata Sánchez; Asesores: M. C. Edwin Mejia Motta y Dr. Eduardo Tepichín R.; INAOE, Tonantzintla, Pue..