



**I
N
A
O
E**

Emulación Electro-óptica de Una Computadora Simple, Empleando Una Memoria Holográfica Dinámica

por:

Eloy Edmundo Rodríguez Vázquez

Ing. Instituto Tecnológico de Querétaro

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
Septiembre 2006
Tonantzintla, Puebla, México

Supervisada por:

Dr. Eduardo Tepichín Rodríguez
Dr. David Sánchez De La Llave
Investigadores Titulares del INAOE

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



INDICE

INDICE	I
INDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN	VII
DEDICATORIAS	VIII
AGRADECIMIENTOS	XI
CAPITULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Revisión histórica	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Estructura de la tesis	3
Referencias	5
CAPITULO 2	
COMPUTADORA BÁSICA (FUNDAMENTOS)	7
2.1 Introducción	7
2.2 Computadora básica	8
2.3 Hardware	9
2.3.1 Unidad central de procesamiento	9
2.3.2 Dispositivo de almacenamiento de datos	10
2.3.3 Dispositivos de entrada y salida de datos	13
2.3.4 Buses de direccionamiento, control y datos	13
2.4 Software	15
2.4.1 Lenguaje máquina	15
2.4.2 Lenguaje ensamblador	15
2.4.3 Ensamblador	17

Referencias	19
CAPITULO 3	
MEMORIA HOLOGRÁFICA DÍNAMICA	20
3.1 Introducción	20
3.2 Sistema óptico	21
3.2.1 Cristal fotorrefractivo	21
3.2.2 Modulador espacial de luz	22
3.1.3 Sistema interferométrico de una sola lente	27
3.3 Sistema mecánico	28
3.4 Sistema electrónico	29
3.5 Software de control	31
3.5.1 Codificación y despliegue	31
3.5.2 Control del mecanismo	33
3.5.3 Decodificación y procesamiento	34
3.6 Resultados preliminares	35
Referencias	38
CAPITULO 4	
COMPUTADORA BÁSICA ELECTRO-ÓPTICA	39
4.1 Introducción	39
4.2 Hardware	40
4.3 Software	41
4.3.1 Programa objeto	42
4.3.2 Programa fuente	44
4.3.3 Ejecución del programa	48
4.4 Resultados experimentales	48
4.4.1 Análisis de resultados	50
Referencias	52

CAPITULO 5	
CONCLUSIONES GENERALES	53
CAPITULO 6	
TRABAJO A FUTURO	55
6.1 Control digital para la posición espacial de un cristal fotorrefractivo	55
6.2 Sistema digital electro-óptico de multiprocesadores paralelos	57
6.3 Multicompuerta XNOR holográfica	58
APENDICE A <i>Efecto fotorrefractivo</i>	61
APENDICE B <i>Holografía</i>	68
APENDICE C <i>Cristal LiNbO₃</i>	75
APENDICE D <i>Lista de trabajos</i>	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de bloque de una computadora digital básica.	9
Figura 2.2 Arquitectura de un microprocesador Intel 80486.	10
Figura 2.3 Diagrama de bloque de una memoria de acceso aleatorio.	12
Figura 2.4 Sistema de cómputo.	14
Figura 3.1 Moléculas del cristal líquido.	22
Figura 3.2 Estructura básica de un LCD de transmisión.	23
Figura 3.3 Orientación de las moléculas del cristal líquido en un LCD.	23
Figura 3.4 Proceso de transmisión de luz a través de un LCD en ausencia de campos eléctricos.	24
Figura 3.5 Proceso de transmisión de luz a través de un LCD en presencia de campos eléctricos.	25
Figura 3.6 Dimensiones características de la pantalla LCD.	26
Figura 3.7 Esquema del sistema óptico dinámico implementado para almacenar hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de LiNbO ₃ :Fe.	28
Figura 3.8 mecanismo de posicionamiento espacial.	29
Figura 3.9 Tarjeta electrónica del sistema de posición 3D.	30
Figura 3.10 Panel frontal del software de control.	32
Figura 3.11 Etapa de codificación y despliegue de la información.	33
Figura 3.12 Decodificación y procesamiento	34
Figura 4.1 Esquema del sistema electro-óptico.	41
Figura 4.2 Diagrama de flujo del programa almacenado en la memoria holográfica.	42
Figura 4.3 Panel frontal de programa fuente.	44
Figura 4.4 Distribución de la información en cada página binaria	46

Figura 4.5 Distribución espacial de los hologramas de Fourier de las paginas binarias dentro del cristal fotorrefractivo.	46
Figure 4.6 Arreglo experimental del sistema electro-óptico diseñado para emular una computadora básica.	51
Figura 6.1 Sistema electromecánico que controla la posición del cristal fotorrefractivo a través de la retroalimentación de la posición y velocidad.	56
Figura 6.2 Sistema digital electro-óptico de multiprocesadores paralelos.	58
Figura 6.3 Sistema holográfico implementado como compuerta lógica XNOR.	59
Figura 6.4 Lógica de estados de la compuerta XNOR holográfica.	60
Figura A1. Efecto Pockels en el LiNbO3 [A2].	62
Figura A.2. Reacciones físicas presentadas durante el efecto fotorrefractivo.	65
Figura B.1 Sistema interferométrico para la fabricación de un holograma.	69
Figura B.2 Reconstrucción de la imagen holográfica.	70
Figura B.3 Luz Difractada por Una Red Holográfica de Volumen.	71
Figura B.4 Sistema implementado para grabar los hologramas en el cristal fotorrefractivo.	72
Figura B.5 Sistema implementado para observar el holograma.	73
Figura C.1 Cristales LiNbO3 dopados.	77
Figura C.2 Características del LiNbO ₃ .	78
Figura C.3 Interacción de una onda luminosa con un elipsoide de índices.	79
Figura C.4. Gráfica de la diferencia de índices contra el ángulo θ .	80

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Registros de un microprocesador.	11
Tabla 2.2 Instrucciones básicas del lenguaje máquina.	16
Tabla 2.3 Programa del lenguaje ensamblador para restar dos números.	17
Tabla 3.1 Dimensiones características de la pantalla LCD.	26
Tabla 3.2 Resultados preliminares.	35
Tabla 3.3 Presencia de los errores.	37
Tabla 4.1 Programa propuesto.	43
Tabla 4.2 Codificación de las instrucciones del programa objeto.	45
Tabla 4.3 Codificación del programa objeto.	47
Tabla 4.4 Imágenes experimentales de las páginas binarias.	48
Tabla 4.5 Segunda parte de las imágenes experimentales de las páginas binarias de las instrucciones del programa objeto.	49
Tabla 4.6 Características experimentales.	50
Tabla C.1. Tabla del los índices de refracción y permitividades dieléctricas del LiNbO_3 .	77

RESUMEN

En este trabajo de tesis se describe una propuesta experimental de un dispositivo electro-óptico, que emula un sistema digital reconocido técnicamente como computadora básica.

La arquitectura física de una computadora básica depende en gran medida de las necesidades específicas que debe satisfacer; siendo la más simple, la que integra dentro de sus componentes físicos (hardware) a: una unidad de control de procesos (microprocesador), un dispositivo de almacenamiento de instrucciones o datos (memoria), un dispositivo de entrada y un dispositivo de salida de información mediante los cuales el usuario tiene la capacidad de interactuar con el sistema.

La aportación tecnológica del sistema digital desarrollado en este trabajo, es la de utilizar una memoria holográfica como dispositivo de almacenamiento de instrucciones. Dicha memoria holográfica fue desarrollada por el grupo de ciencias de la imagen del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, y su optimización para ser implementada como dispositivo de almacenamiento de instrucciones forma también parte de este trabajo.

DEDICATORIA

A nuestro señor **Jesucristo**. Como una muestra de amor recíproco; expresado en esfuerzo, dedicación y responsabilidad en mi trabajo y como comprensión, apoyo y afecto hacia mis semejantes. Gracias **DIOS**, por darme esta oportunidad de vida. Perdonar mis faltas.

A mis padres **Ma. Irma Vázquez González y Eloy Edmundo Rodríguez Guerra**. Este trabajo, no es más que una prueba más de lo que su amor es capaz de lograr. Padre, eres mi más grande orgullo, mi ejemplo de vida. Mamá, mi impulso e inspiración eres tú; te amo con todo mi corazón. Gracias por todo su apoyo y amor.

A mis hermanos **Claudio y Jorge**. Mi pasión demostrada en este trabajo, es opacada por la comparación con su pasión por la vida. Gracias por compartir conmigo todos esos momentos. *Uno para todos y todos para uno.*

A mis abuelitos **Fidencio y Sarita, Javier y Rita**. Yo sé que de mí están siempre pendientes. Su ejemplo de amor, guía a cada día mi camino.

A la flor más bella, con la que Dios pudo darme la oportunidad de vivir esta experiencia de amor. **Helen**, ten fe, Dios no se equivoca.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por otorgarme la beca #190263, para realizar mis estudios de Maestría en el INAOE, y por el apoyo otorgado a través del proyecto PY-42822.

Al Dr. Eduardo Tepichín Rodríguez, por brindarme más que su apoyo docente y científico, su amistad, que tanto aprecio y valoro.

A los integrantes del Grupo de Ciencia de la Imagen: Gustavo Zavaleta, Jorge Ibarra, Alejandro Landa, Dra. Albertina Castro, Dra. Estela, Dr. José Guadalupe, y el Dr. David Sánchez.

A las coordinaciones de Óptica y Docente, especialmente a: Roció Rodas, Martha Olmos, Liliana, Paty, Dr. Murphy, Dr. Reydesel, Dr. Ponciano y Dr. Padilla, por nunca negarme su apoyo.

A mis tíos Juan y Luís Rodríguez, porque nunca podré pagar todo lo que han hecho por mi padre. A mi tío Patricio, porque tus consejos me han impulsado a ser siempre mejor, te extraño mucho tío. A toda mi extensa familia: tíos, primos y sobrinos, Rodríguez y Vázquez, porque a todos aprecio, respeto y agradezco su apoyo.

A la familia Zúñiga Osorio, Por brindarme más que su amistad, la oportunidad de formar parte de ustedes.

A mis compadres cubanos, Alberto Delgado Atencio y Margarita Cunill. Gracias por saberme su hermano.

A la familia García Porquillo, en especial a Don Miguel y Doña Toñita. Por aguantarme este tiempo.

A mis amigos: Alfonso, David, Richard, Erasmo, Axel, José, Dávila, Ulises, Lázaro, Marcos, Estrella, Aldo, Luz, Alberto, Jaime y el Marciano.

A mi aliado, el INAOE, por compartir el sueño de un México mejor.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Revisión histórica

El físico Dennis Gabor en 1948, al proponer una nueva técnica de microscopia en su trabajo “ *A new microscopic principle* ” [1.1], fue el primero en describir el principio de lo que hoy se conoce como holografía. Sin embargo, el reconocimiento tecnológico de la holografía sucedió hasta 1962, debido a que con la implementación del láser las imágenes obtenidas tenían mayor nitidez y mayor campo de visión. Tal fue el impacto de la holografía que en 1971 Gabor se hizo acreedor a el premio Nobel de física.

Dentro de las aplicaciones tecnológicas que se han dado a la holografía, destaca la propuesta del holandés Van Heerden en 1963 [1.2]. Esta propuesta consiste en almacenar información binaria en forma de hologramas de Fourier dentro de un medio de registro holográfico. Heerden postuló que el volumen mínimo necesario para grabar un bit de información

es $\sim\lambda^3$, hecho que hace que la densidad de datos llegue a ser 1000 veces mayor que la obtenida con tecnologías como CD-ROM y DVD [1.3].

La desventaja de la propuesta experimental de Van Heerden, fue que no existía ningún medio de registro holográfico no permanente; por lo que con el descubrimiento del efecto fotorrefractivo (cambio del índice de refracción inducido ópticamente) en 1966, esta propuesta tomo aun más impulso. Los primeros que observaron el efecto fotorrefractivo en cristales ferroeléctricos fueron Ashkin y sus colaboradores en los laboratorios Bell; quienes se encontraban estudiando las características ópticas del LiNbO_3 y LiTaO_3 [1.4]. Dos años después Chen et al [1.5], sugirieron que este fenómeno, podría tener aplicaciones interesantes, por ejemplo en el almacenamiento holográfico de datos.

1.2 Formulación del problema

Debido a la gran densidad de información que se puede lograr con la holografía y al desarrollo tecnológico de materiales fotorrefractivos, un gran número de grupos y asociaciones científicas se han dado a la tarea de desarrollar dispositivos holográficos para el almacenamiento de información [1.6 – 1.16]; incluso se han desarrollado patentes de invención para dispositivos comerciales [1.17, 1.18].

Siguiendo la tendencia de aplicar la holografía como tecnología alternativa para el almacenamiento de información, el grupo Ciencia de La Imagen del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica ha desarrollado una memoria holográfica. Que utiliza como medio de registro un cristal fotorrefractivo de Niovato de Litio dopado con Fierro ($\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$). Su sistema óptico cuenta solo con una lente; que se encarga de formar la

transformada de Fourier de la página binaria donde se encuentra codificada la información a almacenar dentro del cristal y de formar la imagen de salida al leer el holograma almacenado [1.19 – 1.21].

Es una realidad que los dispositivos de almacenamiento holográfico no han tenido el éxito que se esperaba; y esto se debe en gran parte al desarrollo tecnológico que recientemente han tenido los dispositivos electrónicos. Por esta razón, en este trabajo el grupo de ciencias de la imagen propone combinar estas dos tecnologías para que aprovechando las ventajas que cada una de ellas tiene, se propone un sistema electro-óptico que emule lo que tecnológicamente se conoce como computadora básica. En este sistema el procesamiento, la introducción y la visualización de información se realizan de forma electrónica, mientras que el almacenamiento de las instrucciones que conforman el programa que gobierna el comportamiento del sistema se realiza de forma óptica.

1.3 Estructura de la tesis

Antes de comenzar a describir cómo es que se utilizó una memoria holográfica como dispositivo de almacenamiento de instrucciones dentro de una computadora básica, este trabajo de tesis comienza en el capítulo 2 dando los fundamentos teóricos que ayudaran a comprender mejor el concepto de computadora básica. En este primer capítulo se describen tanto a los componentes, como a la integración total necesaria para que dichos componentes interactúen de manera que el sistema integrado realice la tarea para la cual fue diseñado.

Para almacenar holográficamente las instrucciones del programa que ejecuta la computadora básica electro-óptica, dichas instrucciones son

primero codificadas como páginas binarias de información (matrices de píxeles claros y oscuros); para después ser almacenadas como hologramas de Fourier dentro del cristal fotorrefractivo. Posteriormente las imágenes extraídas de los hologramas son capturadas por una cámara CCD, e interpretadas por una computadora. Para almacenar todos los hologramas de las instrucciones del programa, se implementó un sistema electromecánico que desplaza el cristal fotorrefractivo a la posición en donde se encuentra la instrucción que se desea leer.

El capítulo 3 describe a detalle todos los procedimientos que conforman el sistema de la memoria holográfica y presenta algunos resultados preliminares que reafirman que el funcionamiento de este dispositivo es el adecuado para almacenar hologramas de Fourier de las páginas binarias de las instrucciones.

La descripción de cómo fue integrado el sistema electro-óptico que emula una computadora básica, se realiza en el capítulo 4. En dicho capítulo se mencionan los componentes de hardware, y su analogía con los tradicionales, descritos en el capítulo 2. Además se describe el programa almacenado en la memoria holográfica y cómo es que los hologramas de dichas instrucciones se distribuyeron en el interior del cristal fotorrefractivo. Este capítulo culmina presentando y analizando los resultados finales de la implementación práctica de la computadora básica electro-óptica.

Las conclusiones finales se encuentran en el capítulo 5 y el trabajo planteado como futuro de este sistema se describe en el capítulo 6. El soporte teórico del sistema óptico se presenta en los apéndices A, B y C; los cuales tratan los temas de: el efecto fotorrefractivo, la holografía y los cristales de $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. En el apéndice D se enlistan las publicaciones resultantes de este trabajo.

Referencias

- [1.1] D. Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161:777,1948.
- [1.2] V. Heerden "Theory of Optical Information Storage in Solids", *Applied Optics*, Vol 2, No. 4, april 1963, pp. 393-400.
- [1.3] P. Cheben & M. A. Calvo "Óptica avanzada", Ariel Ciencia, Barcelona España, septiembre 2002.
- [1.4] A. Ashikin, G. D. Boyd, J. M Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levenstein, K. Nassau. *Optically induce refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃*, *Applied. Physics. Lett* 9, 72 (1966).
- [1.5] F. S. Chen, J. T. LaMacchia, B. D. Fraser. *Optically induced refractive index inhomogeneties in LiNbO₃ and LiTaO₃*, *Applied Physics. Lett* 13, 223 (1968).
- [1.6] E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marts & N, Massey "Holographic Data Storage in Three-Dimensional Media", *Applied Optics*, Vol. 5, No. 8, august 1966, pp. 1303-1311.
- [1.7] J. A. Rajchman "Promise of Optical Memories", *Journal of Applied Physics*, Vol. 41, No. 3, march 1970, pp. 1376-1383.
- [1.8] W. C. Stewart & L. S. Cosentino "Optics for read-write Holographic Memory", *Applied Optics*, Vol 9, No. 10, October 1970, pp. 2271-2275.
- [1.9] A. L. Mikaeliane, V. I. Bobrinev, S. N. Naumov & L. Z. Sokolova "Design Principles of Holographic Memory Devices", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-6, No. 4, april 1970, pp. 193-198.
- [1.10] B. Hill "Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory", *Applied Optics*, Vol. 11, No. 1, January 1972, pp. 182-191.
- [1.11] L.D. D'auria, J. P. Huignard & E. Spitz "Holographic Read-Write Memory and Capacity Enhancement by 3-D Storage", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. MAG-9, No. 2, june 1973, pp. 83-94.

- [1.12] X. An, D. Psaltis, G. W. Burr, *Thermal fixing of 10,000 holograms in LiNbO₃:Fe*, Applied Optics, Vol 38, No. 2 (1999).
- [1.13] H.J. Coufal, D. Psaltis, G.T. Sincerbox, *Holographic Data Storage*, Springer, USA, 2000.
- [1.14] J. Ashley, C. Jefferson, M. Bernal, B. Marcus, G. Burr, R. Macfarlane, H. Coufal, R. Shelby, H. Guenther, G. Sincerbox, J. Hoffnagle, *Holographic data storage*, IBM Journal Res. Develop, Vol 44, 2000.
- [1.15] B. Javidi, T. Nomura, *Securing information by use of digital holography*, Optics Letters, Vol. 25, 2000.
- [1.16] SPIE, Selected paper on holographic storage.
- [1.17] Bayer MaterialScience, *Nota de Prensa*. Bayer Communications, April 2005, Leverkusen Germany.
- [1.18] D. Levy, F. Monte, T. Belenguer, P. Cheben, A. Núñez, M. Ulibarrena, *Patente de invención 2141653*, España, 2001.
- [1.19] H. Zúñiga, E. E. Rodríguez, E. Tepichín. Memoria holográfica volumétrica automática. XVI CIECE & II CITEE, IEEE proceedings, Sonora, México 2006.
- [1.20] H. Zúñiga, E. E. Rodríguez, A. Castro, E. Tepichín. Memoria holográfica reconfigurable con una lente. 3er. EPMC, Guanajuato, México 2006.
- [1.21] H. Zúñiga, E. E. Rodríguez, G. Ramírez, E. Tepichín. Sistema óptico dinámico implementado para la formación de hologramas de Fourier en un cristal de LiNbO₃:Fe. XLIX CNF & XIX RA AMO, San Luís Potosí, México 2006.

CAPITULO 2

COMPUTADORA BÁSICA

(FUNDAMENTOS)

2.1 Introducción

Fue Blaise Pascal el inventor de la primera máquina desarrollada para el cómputo de información, dicho mecanismo estaba basado en engranes y ruedas, y lo más importante de este hecho fue que ocurrió en el año de 1642, cuando el único antecedente del que se tenía registro era el abaco inventado por los babilonios en el año 500 a.C. En 1837 Charles Babbage auxiliado por la condesa de Lovelace, Augusta Ada Byron, diseñó una máquina calculadora programable que podía almacenar hasta 1000 números decimales de 20 dígitos y un programa con el cual se podía modificar la función de cálculo. Lamentablemente Babbage desistió de la idea de llevar a la práctica su diseño, ya que en aquel tiempo no se contaba con la tecnología requerida para la fabricación de muchas de las piezas mecánicas.

Las compañías pioneras en la fabricación de las calculadoras electrónicas fueron Babbage y Monroe, quienes a principios de los años setenta

del siglo XX lanzaron al mercado los primeros sistemas de cómputo electrónicos; dichos sistemas solo realizaban las cuatro operaciones matemáticas básicas y eran del tamaño de una caja registradora.

Pero no fue sino hasta 1946, cuando en la Universidad de Pennsylvania se desarrolló la primera computadora moderna. Dicha computadora fue llamada ENIAC (Electronics Numerical Integrator and Calculator), y contenía más de 17000 bulbos y 800 km de cables; estos componentes servían para realizar integrales numéricas de dificultad media.

El invento del transistor en 1948 y su posterior integración al circuito integrado digital en 1958 fueron hechos que impulsaron aun más el desarrollo de las computadoras electrónicas. Hasta el grado de que en 1971 Intel Corporación desarrollo el primer microprocesador [2.1].

El objetivo de este capítulo es el de definir el término de computadora básica, además de describir los componentes que la conforman.

1.2 Computadora básica

Una computadora básica, es un sistema digital que está diseñado para ejecutar una tarea de computación específica.

Un sistema digital de computadora básica se subdivide en dos entidades funcionales: hardware y software. El hardware consta de todos los componentes electrónicos y dispositivos electromecánicos que comprenden la entidad física del sistema, mientras que el software consiste de las instrucciones y los datos que la computadora manipula para ejecutar las tareas del procesamiento de datos [2.2].

1.3 Hardware

El hardware dentro de una computadora básica se divide en tres grandes partes, como se muestra en la fig. 2.1.

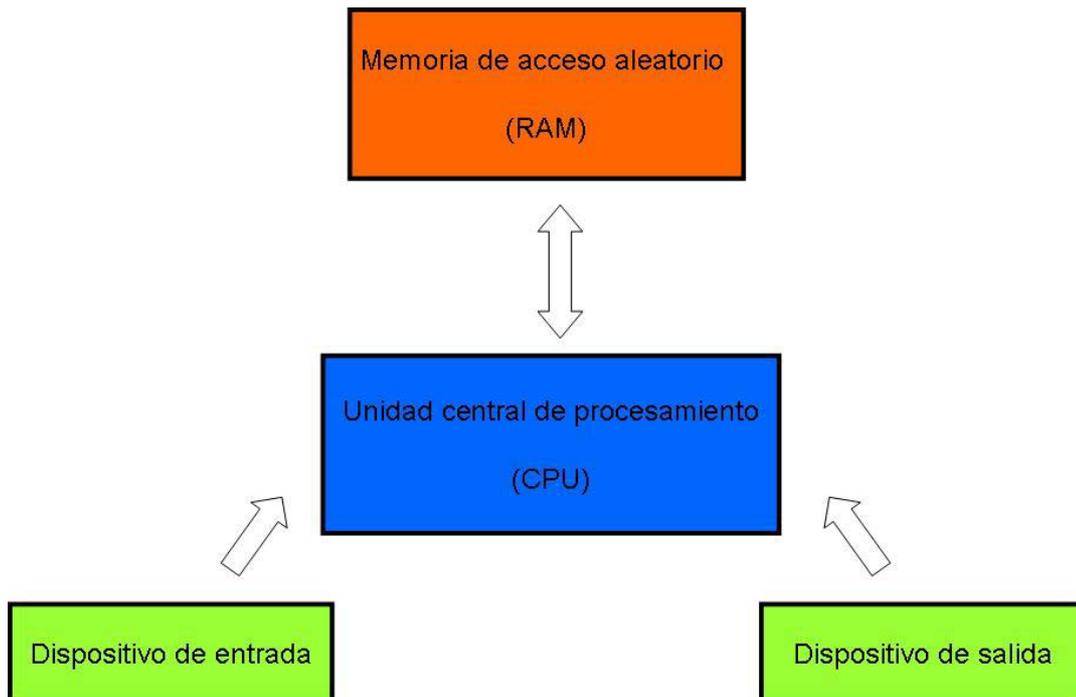


Figura 2.1 Diagrama de bloque de una computadora digital básica.

2.3.1 Unidad central de procesamiento

La unidad central de procesamiento (CPU por sus siglas en inglés) contiene una unidad aritmética y lógica que es la encargada de la manipulación de los datos, varios registros para almacenar datos y circuitos de control para leer y ejecutar las instrucciones almacenadas en la memoria. Físicamente esta unidad central de procesamiento está dispuesta dentro de lo que se conoce como microprocesador. En la fig. 2.2 se muestra como ejemplo la arquitectura de un microprocesador 80486 de la marca Intel.

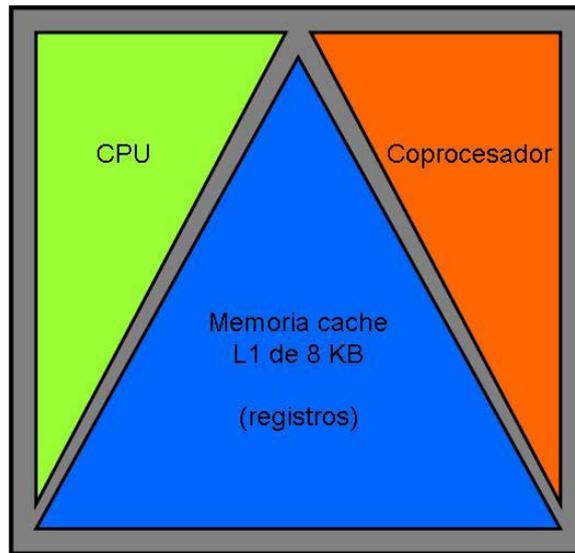


Figura 2.2 Arquitectura de un microprocesador Intel 80486 [2.3].

Dentro de la unidad central de procesamiento, se encuentran varias celdas que almacenan información para el uso específico del procesador. Estas celdas se conocen como registros los cuales se enlistan y describen en la tabla 2.1.

Cabe mencionar los registros no se consideran como localidades de memoria porque como se puede observar tienen un uso específico dentro del microprocesador.

2.3.2 Dispositivo de almacenamiento

La unidad de memoria es un conjunto de celdas de almacenamiento y circuitos de control asociados, necesarios para introducir y leer la información. Este dispositivo almacena las instrucciones y los datos del programa que se ejecutará para realizar la tarea para la cual está diseñado el sistema.

Este dispositivo de almacenamiento es del tipo RAM (Random Access Memory), ya que la unidad central de procesamiento necesita acceder a cualquier parte de la memoria en forma aleatoria para recuperar la información. En la fig. 2.3 se muestra el diagrama de bloque de una memoria de acceso aleatorio.

Tabla 2.1 Registros de un microprocesador.

Registros		Descripción
Registro de Dato	DR	Este almacena el dato a ser utilizado en la siguiente instrucción.
Registro de Dirección	AR	Este contiene la dirección en la cual se encuentra el dato que se desea leer o en la cual se va almacenar.
Acumulador	AC	Este es de uso exclusivo para el procesador.
Registro de Instrucción	IR	Este contiene el código de la instrucción que va a ser realizada por el microprocesador.
Contador de Programa	PC	Este registro cuenta la cantidad de instrucciones que ha realizado el microprocesador.
Registro de Entrada	INPR	Este contiene el dato que es introducido por el usuario a través de un dispositivo de entrada
Registro de Salida	OUTR	Este contiene el dato que es mostrado al usuario por algún dispositivo de salida.

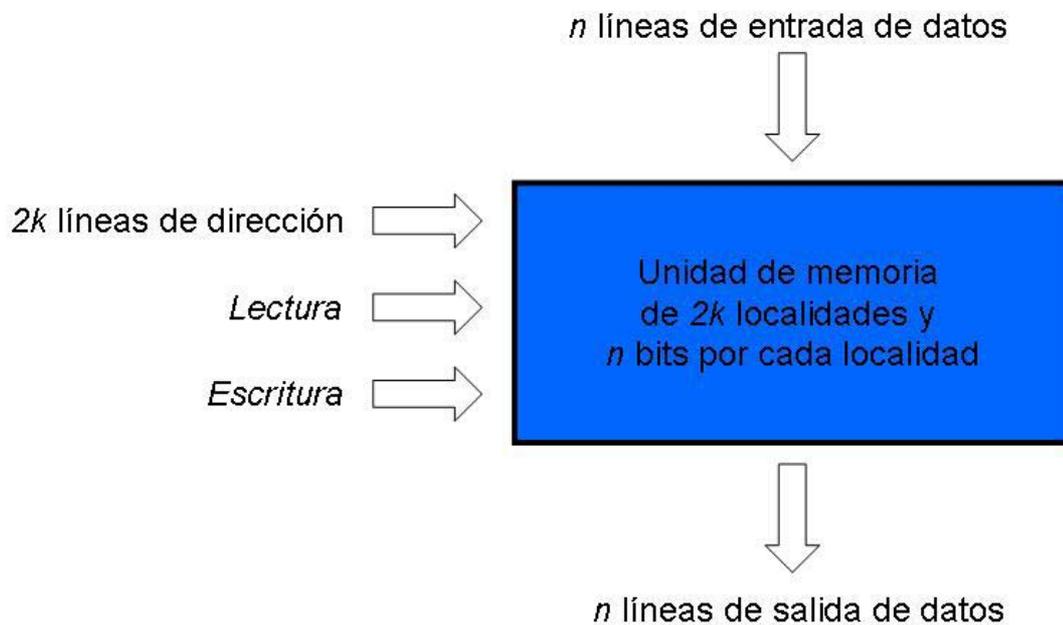


Figura 2.3 Diagrama de bloque de una memoria de acceso aleatorio.

Las dos operaciones que se ejecutan con una memoria de acceso aleatorio son la de escribir y leer información. La señal de escritura especifica una operación de transferencia de entrada, mientras que la señal de lectura especifica una operación de transferencia de salida. Los pasos seguidos para almacenar un dato dentro de una memoria RAM son los siguientes:

1. Señalar en las líneas de direccionamiento la dirección en la cual se desea almacenar el dato nuevo.
2. Aplicar el dato nuevo en las líneas de datos.
3. Activar la entrada de escritura.

Los pasos que deben realizarse para leer un dato que se encuentra almacenado dentro del dispositivo son:

1. Señalar en las líneas de direccionamiento la dirección en la cual se encuentra almacenado el dato que se desea leer.
2. Activar la entrada de lectura.

2.3.3 Dispositivos de entrada y salida de datos

Los dispositivos de entrada y salida de datos, son los encargados de la interacción del usuario con la máquina. Dentro de los dispositivos de entrada, podemos enlistar a: el teclado, el ratón, los disquetes, los CD y DVD-ROMS, las memorias semiconductoras, el escáner, etc. Mientras que del lado de los dispositivos de salida tenemos a: el monitor, las impresoras, las bocinas, etc.

Dentro de la unidad central de procesamiento existe un registro designado para la entrada de datos al sistema, en este registro se almacena el dato que es transformado por el sistema a su forma binaria para que pueda ser procesado por el microprocesador. A su vez, existe otro registro para la salida de datos, el cual almacena el dato que ya fue procesado por el sistema para que después sea transformado de alguna manera que el usuario tenga acceso a él.

2.3.4 Buses de direccionamiento, de datos y de control

El microprocesador es el corazón del sistema de una computadora básica, ya que él es el encargado de controlar los dispositivos de memoria, de entrada y de salida de datos, además del flujo y procesamiento de la

información. Dicho flujo de información se realiza a través de lo que se define como buses. Un bus es un conjunto de conductores comunes que interconectan componentes en un sistema de cómputo. Los buses que interconectan partes de una computadora básica transfieren direcciones, datos e información de control entre el microprocesador y los demás dispositivos. En la fig. 2.4 se muestra el diagrama a bloques de un sistema de cómputo que muestra la estructura de los buses de direcciones, datos y control.

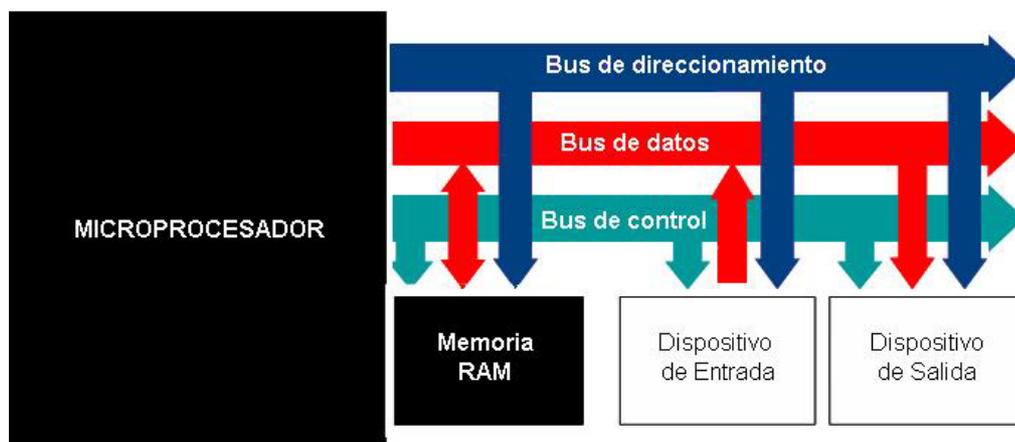


Figura 2.4 Sistema de cómputo.

El bus de direcciones solicita a la memoria una localidad y a los dispositivos de entrada y salida los comunica directamente con su registro asignado dentro del CPU. El bus de datos transfiere información entre el microprocesador y su espacio de direccionamiento de memoria y los dispositivos. El bus de control contiene líneas que seleccionan entre uno de los componentes del sistema, para que se pueda acceder a él a través del bus de direccionamiento y su información viaje en el bus de datos.

El poder del microprocesador radica en su capacidad para ejecutar miles de instrucciones por segundo, provenientes de un programa o software

almacenado en el dispositivo de memoria. A continuación se describirá en qué consiste este programa y cómo es que es ejecutado por una computadora básica.

2.4 Software

Como se mencionó anteriormente el software de una computadora básica está conformado por los datos a procesar y un conjunto de instrucciones que conforman lo que se conoce como programa. Este programa es ejecutado por el hardware para realizar la operación codificada como instrucciones del programa.

2.4.1 Lenguaje máquina

Una vez desarrolladas las máquinas programables, empezaron a aparecer los programas y lenguajes de programación. El primero de estos fue el conocido como “lenguaje máquina” [2.1], el cual consta de un conjunto de instrucciones que se convierten en códigos binarios y son almacenados en el dispositivo de almacenamiento. En la tabla 2.2 se muestran las instrucciones básicas del lenguaje máquina.

2.4.2 Lenguaje ensamblador

Un lenguaje de programación se define mediante un conjunto de reglas. Los usuarios deben apegarse a todas estas reglas de formato del lenguaje si desean que sus programas se traduzcan en forma correcta. Casi cada computadora tiene su propio lenguaje ensamblador. Las reglas para escribir un programa en lenguaje ensamblador se documentan y se publican en manuales que, por lo general, tiene disponibles el fabricante de la computadora.

Tabla 2.2 Instrucciones básicas del lenguaje máquina.

Instrucción	Descripción
AND	Aplicar AND entre una localidad de memoria y AC
ADD	Sumar una localidad de memoria a AC
LDA	Cargar una localidad de memoria a AC
STA	Almacenar AC en una localidad de memoria
BUN	Brincar la siguiente instrucción en forma incondicional
BSA	Brincar y guarda la dirección de retorno
ISZ	Incrementar y brinca si hay cero
CLA	Borrar AC
CMA	Complementar AC
CIR	Circular a la derecha AC
CIL	Circular a la izquierda AC
INC	Incrementa AC
SPA	Brincar la siguiente instrucción si AC es mayor que cero
SNA	Brincar la siguiente instrucción si AC es menor que cero
SZA	Brincar la siguiente instrucción si AC es cero
HLT	Detener computadora
INP	Introducir un carácter en AC
OUT	Sacar un carácter de AC
SKI	Brincar si hay bandera de entrada
SKO	Brincar si hay bandera de salida
ION	Interrupción encendida
IOF	Interrupción apagada

La unidad básica de un programa de lenguaje ensamblador es una línea de código. El lenguaje específico se define mediante un conjunto de reglas que especifican los símbolos que pueden utilizarse y cómo pueden combinarse para formar una línea código. En la tabla 2.3 se enlistan las

instrucciones del lenguaje ensamblador de un programa que resta dos números.

Tabla 2.3 Programa del lenguaje ensamblador para restar dos números.

Instrucción	Descripción
ORG 100	Origen del programa en la posición 100
LDA SUB	Carga el sustraendo en AC
CMA .	Complementa AC
INC .	Incrementa AC
ADD MIN	Sumar el minuendo a AC
STA DIF	Almacena diferencia
HLT .	Detener computadora
MIN, DEC 83	Minuendo
SUB, DEC -23	Sustraendo
DIF, HEX 0 .	La diferencia esta almacenada aquí
END .	Fin del programa simbólico

1.4.3 Ensamblador

Una vez que se tiene el programa del lenguaje ensamblador, el software ensamblador traduce el código gráfico al código binario equivalente. El ensamblador es conocido como programa fuente, mientras que el programa binario se identifica como programa objeto. El ensamblador opera sobre cadenas de caracteres y produce una interpretación binaria equivalente.

En resumen podemos terminar este capítulo mencionando que una computadora básica es un sistema digital cuyos componentes de hardware son los mínimos requeridos para que dicho sistema realice una tarea específica; almacenada como software en el elemento básico de almacenamiento de información.

A continuación, en el siguiente capítulo se describe la memoria holográfica desarrollada en un trabajo anterior a esta tesis por el grupo de ciencias de la imagen; la cual fue optimizada para su implementación como elemento de almacenamiento de información dentro de una computadora básica.

Referencias

- [2.1] Barry B. Brey, Los Microprocesadores Intel, Ed. Person Education, 2001.
- [2.2] M. Morris Mano, Arquitectura de Computadoras, Ed. Person Education, tercera edición, 1994.
- [1.3] Intel, 80486 datasheet, www.intel.com

CAPITULO 3

MEMORIA HOLOGRÁFICA DÍNAMICA

3.1 Introducción

La holografía como tecnología para el almacenamiento masivo de información, es una alternativa que está siendo explotada recientemente por su capacidad de almacenamiento. Dicha capacidad es 50 veces superior a la capacidad de los actuales DVD's [3.1], ya que según los cálculos realizados alcanza los 100 Gb/cm³ [3.2]. Con el propósito de contribuir al desarrollo de este tipo de tecnología, en el grupo de ciencias de la imagen del INAOE hemos desarrollado un dispositivo para el almacenamiento holográfico de datos [3.3].

Como parte de este trabajo, la memoria holográfica mencionada fue optimizada para ser implementada como dispositivo de almacenamiento de instrucciones de un sistema de una computadora básica electro-óptica. El objetivo de este capítulo es describir el funcionamiento y la integración tecnológica de este dispositivo de almacenamiento holográfico.

3.2 Sistema óptico

La gran capacidad de almacenamiento que se logra al implantar la holografía como tecnología alternativa, se basa en el hecho de que, en el volumen total del elemento de registro holográfico; cada cubo de longitud de onda (λ) por lado, funciona como una celda de almacenamiento de información independiente [3.4]. Es decir, en cada cubo de λ^3 de volumen, se registra un holograma de Fourier de una página binaria de información; en la cual se encuentra la información que se desea almacenar codificada como un mapa de píxeles blancos y negros. La capacidad por celda depende del número de píxeles de las páginas binarias, las cuales en comparación con los sistemas de almacenamiento óptico convencionales, ocupan el mismo volumen físico que un solo bit.

A continuación se describirán de manera breve los componentes del sistema óptico del dispositivo de almacenamiento holográfico.

3.2.1 Cristal fotorrefractivo

Experimentalmente el cristal fotorrefractivo implementado para almacenar las instrucciones como hologramas de Fourier es de Neovato de Litio dopado con Hierro ($\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$); lo cual es conveniente ya que los cristales fotorrefractivos más estudiados son los ferroeléctricos, las selenitas y los semiconductores [3.5]. Además de que el LiNbO_3 pertenece al grupo de los cristales ferroeléctricos, sus propiedades son las óptimas para realizar este tipo de dispositivos. Estos cristales presentan una polarización espontánea, debida a que en el estado ferroeléctrico los centros de carga negativa no coinciden con los centros de carga positiva; por lo que se crea un momento bipolar aun en ausencia de campos eléctricos externos. Esta

característica que tecnológicamente se aprovecha para registrar en este tipo de cristales, distribuciones no homogéneas de luz como las causadas por la interferencia de dos haces de luz coherente.

Para tener una mejor comprensión de cómo se almacenan físicamente los hologramas dentro de un cristal fotorrefractivo, se ha incluido en el apéndice A de este trabajo una descripción del efecto fotorrefractivo; dicha descripción es complementada en el apéndice B por una descripción de los hologramas de volumen.

3.2.2 Modulador espacial de luz

En el sistema experimental, se implementó una pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) como modulador espacial de luz.

Un cristal líquido es una sustancia que se caracteriza porque al ser sometido a un campo eléctrico, sus moléculas se reorientan según la magnitud de dicho campo. En la fig. 3.1 se puede observar la forma estirada de las moléculas del cristal líquido y cómo se encuentran ordenadas en el espacio.



Figura 3.1 Moléculas del cristal líquido.

La estructura básica de un LCD, se puede observar en la figura 3.2.

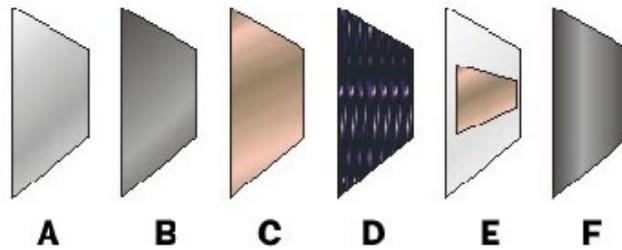


Figura 3.2 Estructura básica de un LCD de transmisión.

donde las capas son:

- A: Espejo.
- B: Filtro polarizador Vertical.
- C: Electrodo Transparente.
- D: Cristal líquido.
- E: 2do. Electrodo Transparente.
- F: Filtro polarizador Horizontal.

En un LCD, el material del cristal líquido está organizado en capas sucesivas; la posición de las moléculas de cada capa está ligeramente desfasada unas de otras, de tal manera que entre la primera y la última capa hay un desfase total de 90° cuando no hay influencia de ningún campo eléctrico [3.6], como se puede observar en la fig. 3.3.

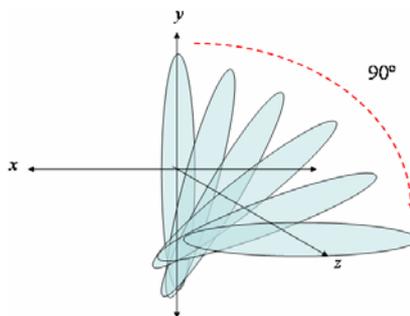


Figura 3.3. Orientación de las moléculas del cristal líquido en un LCD.

La luz que proviene del exterior con polarización aleatoria, es polarizada por el filtro polarizador vertical. De manera que solo luz con polarización lineal vertical, incide en el cristal líquido. Cuando la luz se encuentra viajando a través del cristal líquido y éste no está sometido a ningún campo eléctrico, su polarización a la salida de dicho cristal está desfasada 90° con respecto a su polarización de incidencia; es decir tiene una polarización horizontal. Ya que la polarización de la luz que sale del cristal líquido es horizontal, el filtro polarizador horizontal es transparente a ella, y por tanto toda es transmitida. Este proceso se ilustra en la fig. 3.4.

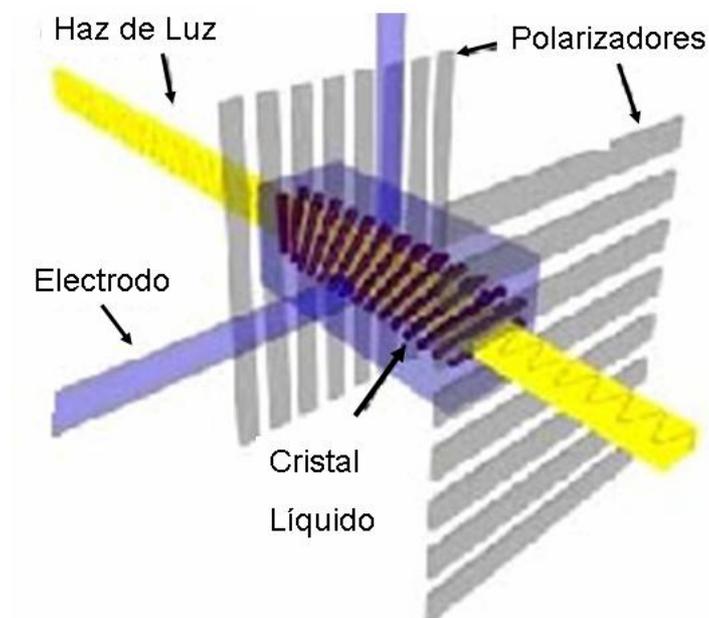


Figura 3.4. Proceso de transmisión de luz a través de un LCD en ausencia de campos eléctricos.

En la fig. 3.5 se puede observar el proceso de transmisión de la luz a través de un LCD, cuando el cristal líquido está siendo expuesto a un campo eléctrico.

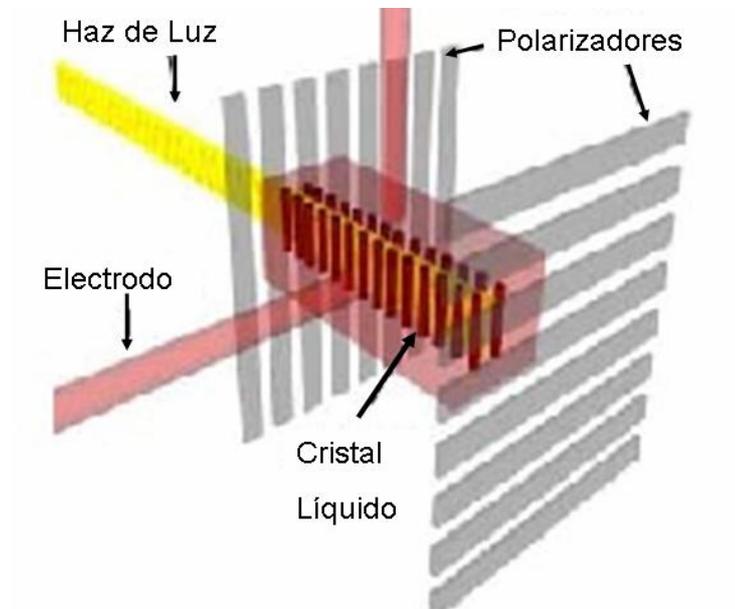


Figura 3.5. Proceso de transmisión de luz a través de un LCD en presencia de campos eléctricos.

En este caso, la luz al salir del cristal líquido tiene la misma polarización que al incidir, ya que las moléculas de dicho cristal se reorientaron por la presencia de un campo eléctrico. De esta manera, el filtro polarizador horizontal obstruye en su totalidad la luz que incide en él.

En la práctica las pantallas de LCD, son distribuciones matriciales de píxeles. Donde cada píxel es un pequeño arreglo como el que se describió anteriormente. Las características espaciales de la pantalla LCD que se utilizó durante el desarrollo de este trabajo, se encuentran en la tabla 3.1 y pueden observarse en la fig. 3.6.

Tabla 3.1. Dimensiones características de la pantalla LCD.

	Horizontal	Vertical
Resolución Espacial (No. De Píxeles)	800	600
Dimensión del Display	26.4 mm	19.8 mm
Dimensión del Píxel	33 μm	33 μm
Dimensión del Área Activa del Píxel	28 μm	24 μm

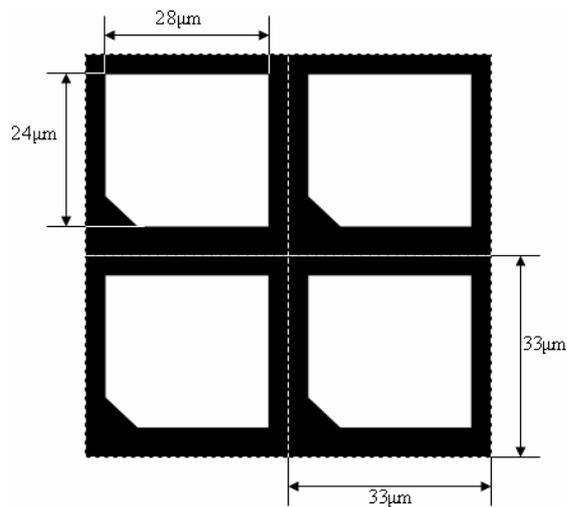


Figura 3.6. Dimensiones características de la pantalla LCD

3.2.3 Sistema interferométrico de una lente

El esquema interferométrico implementado en el dispositivo de almacenamiento holográfico se muestra en la fig. 3.7. La fuente de luz es un láser de Helio-Neón ($\lambda = 633 \text{ nm}$), con 35mW de potencia luminosa; colocado de forma tal, que la polarización del haz, emerge de manera lineal vertical con respecto al plano de la mesa interferométrica en la cual fue montado el experimento. Este haz de luz incide en un divisor de haz de la Marca Newport, modelo M-930-51 [3.7]; del cual emergen dos haces a una potencia de 15mW, pero con polarizaciones lineales perpendiculares. El haz objeto es expandido espaciadamente, de manera tal que al incidir en una pantalla de cristal líquido (LCD) ésta es iluminada homogéneamente con una mínima pérdida de potencia luminosa. En el LCD se encuentra desplegado un mapa de píxeles claros y oscuros. Este hecho provoca que la polarización de la luz proveniente de píxeles de diferentes naturaleza sea perpendicular; es decir, que si el haz objeto antes del LCD tiene una polarización lineal horizontal, la pantalla rota 90° dicha polarización en donde se encuentre los píxeles oscuros, mientras que la polarización horizontal se mantiene en donde los píxeles sean claros.

Al atravesar al lente el haz objeto se transforma en un haz convergente. El punto de convergencia de este haz se encuentra dentro del cristal fotorrefractivo, en donde interfiere también con el haz de referencia de manera que se forma un patrón de interferencia dentro del cristal. Ya que la intensidad del campo luminoso en el punto de interferencia es proporcional a la transformada de Fourier de la información desplegada en el LCD, se dice que el holograma registrado es del tipo Fourier.

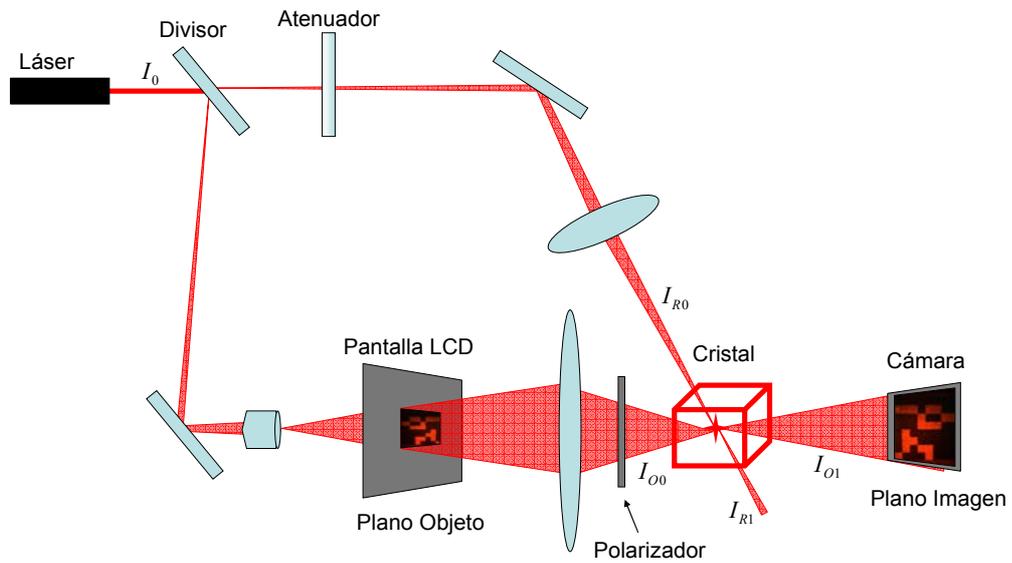


Figura 3.7. Esquema del sistema óptico dinámico implementado para almacenar hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$.

La imagen de salida presentará una inversión de contraste, ya que solo los píxeles oscuros (rotados 90°) pueden interferir con el haz de referencia, ya que ambos tienen la misma polarización. Debido a esto se colocó un polarizador antes del cristal, con el objetivo de bloquear el campo luminoso proveniente de los píxeles claros; de forma que se pueda disminuir el ruido en la imagen de salida. Además, esta imagen de salida se enfoca en el plano imagen, que es el conjugado del plano objeto en el cual se encuentra la LCD.

3.3 Sistema mecánico

Debido a que las dimensiones del patrón de interferencia son milimétricas, se pueden almacenar varios hologramas de Fourier dentro del cristal de $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, si se desplaza éste espacialmente; ya que sus dimensiones son 1 cm^2 en la cara y 2 mm de espesor.

Para desplazar espacialmente el cristal fotorrefractivo se implementó un sistema mecánico de desplazamiento en 3D; el cual consta de tres tornillos sinfín desplazados angularmente través de tres motores de pasos. En la fig. 3.8 se muestra el mecanismo de posicionamiento espacial.



Figura 3.8 mecanismo de posicionamiento espacial.

Con los tres motores de paso, se controla de forma independiente las coordenadas X, Y y Z. Los motores de paso tienen una resolución angular de $1,8^\circ$ por paso, que se transforma en una resolución lineal de 0,0025 mm para cada uno de los ejes X, Y y Z; que en este caso son suficientes debido a que el diámetro del orden central del patrón de difracción es mayor a estas resoluciones lineales.

3.4 Sistema electrónico

La comunicación entre los motores y la computadora se realiza por medio del puerto serial, usando como tarjeta de control un sistema electrónico (ver Fig. 3.9) que consiste básicamente en un microcontrolador PIC16F877, el cual manipula la posición de los motores a través de tres drivers L293B.



Figura 3.9. Tarjeta electrónica del sistema de posición 3D

El modo de operación del sistema electrónico inicia cuando la computadora envía una secuencia de pulsos que obedecen al protocolo de comunicación RS232C. En dicha secuencia se indican los sentidos de giro y el número de pasos que debe realizar cada motor. El microcontrolador recibe esta información, la interpreta y envía las secuencias de pasos a los motores para mover el cristal a la posición deseada; ya sea para grabar nueva información o leer información almacenada. Una vez desplazado el cristal, el circuito responde con una secuencia que informa a la computadora los movimientos realizados.

3.5 Software de control

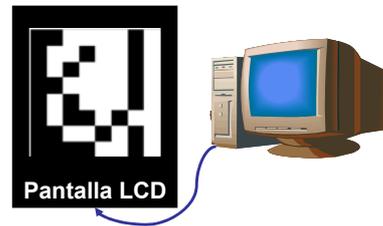
El software de control realiza varias tareas. Por lo que. Para realizar una descripción adecuada de éste se ha dividido en tres partes. En la primera parte, se describe el proceso de codificación de la información en forma de páginas binarias y cómo son desplegadas en la pantalla LCD. La segunda parte describe el control del sistema mecánico de posicionamiento tridimensional, y se finaliza describiendo el proceso de digitalización de la imagen y decodificación de las páginas binarias. En la fig. 3.10 se ilustran las etapas del software de control.

3.5.1 Codificación y despliegue de información

La primera tarea que realiza el software de control es la codificación de la información en forma de páginas binarias. Para realizar esta tarea el usuario introduce la información en el espacio destinado para la información a codificar, en panel frontal de la fig. 3.10a. Una vez tecleada la información, el usuario ejecuta el programa; para que de forma secuencial cada carácter de cada palabra escrita se transforme en un código binario de 8 bits. De esta manera se tiene un vector binario por cada caracter y después (todos los vectores binarios) se multiplexan para que toda la palabra en cuestión se transforme en una matriz binaria. Esta matriz se sobre muestrea espacialmente para que se trasforme en una imagen binaria (pixeles blancos o negros) y sea desplegada en la pantalla LCD. Esta etapa controla además el funcionamiento de la pantalla LCD (vea fig. 3.11).



a) Codificación de la información en forma de páginas binarias.



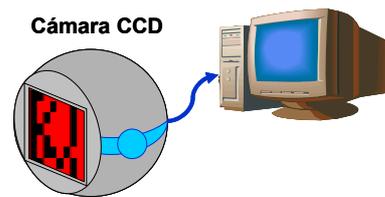
b) Despliegue en la LCD de las páginas binarias.



c) Control del sistema mecánico de desplazamiento.



d) Decodificación y procesamiento de la información



e) Adquisición de la información como imagen.

Fig. 3.10 Panel frontal del software de control.

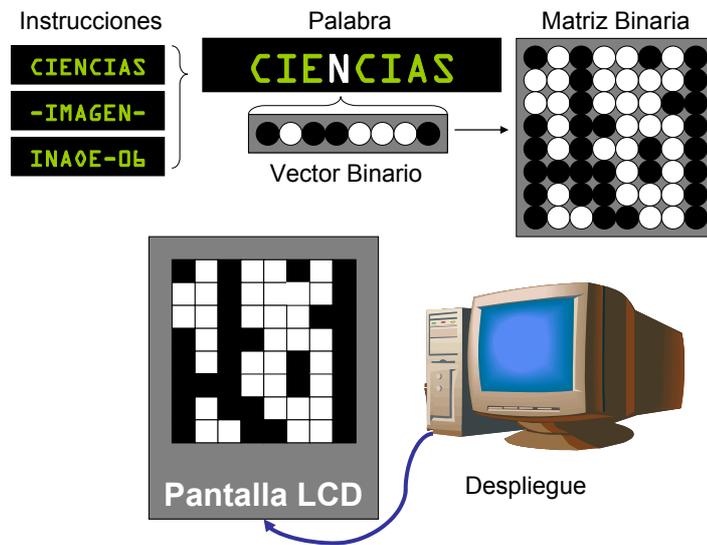


Figura 3.11. Etapa de codificación y despliegue de la información.

3.5.2 Control del mecanismo de desplazamiento

Ya que se encuentra lista la información a grabar desplegada en la LCD; es necesario desplazar el cristal fotorrefractivo a otra posición, con el objetivo de almacenar o recuperar la información según la disposición del usuario. Para este propósito, el usuario introduce en la etapa de control del sistema mecánico las coordenadas (ver Fig. 3.10c), de las posiciones en donde se desea almacenar o de donde se desea recuperar la información. Esta etapa envía a través del puerto serial, una cadena de caracteres con la información de los giros y de los desplazamientos que se deben realizar. El circuito electrónico gobernado por un microcontrolador, interpreta esta cadena y envía mediante pulsos eléctricos, las secuencias necesarias para mover los motores de pasos que se encuentran acoplados a cada eje del mecanismo de posición. Una vez que se realiza esta tarea, el microcontrolador responde con otra cadena de caracteres; que lleva la información de los desplazamientos realizados y su giro. El software de

control interpreta esta información, y si es semejante a la que él mismo envió; con esto se finaliza esta etapa. En el caso contrario, nuevamente envía otra cadena con la información de los errores de desplazamiento, para que el circuito corrija la posición del cristal.

3.5.3 Decodificación y procesamiento

Si el usuario desea decodificar la información, el cristal fotorrefractivo es desplazado hasta la posición de donde se desea extraer la información almacenada. Una vez en esa posición, la cámara CCD (previamente enfocada) adquiere la imagen de la página binaria almacenada como holograma de Fourier. Los niveles de los píxeles de esta imagen son promediados y comparados con un nivel digital (sensibilidad) para obtener una matriz binaria equivalente a la adquirida como imagen. Después, esta matriz es multiplexada, para obtener los vectores binarios pertenecientes a cada carácter. Estos caracteres son acomodados y desplegados como palabras en la columna de instrucciones de la tabla de control (ver Fig. 3.12).

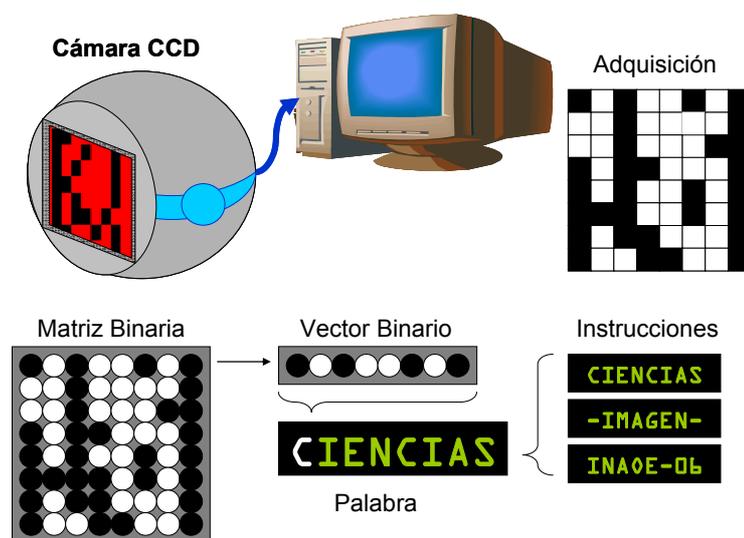


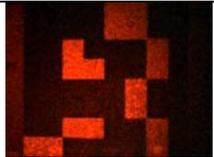
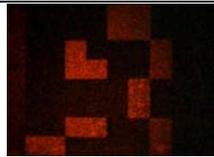
Figura 3.12 Decodificación y procesamiento

3.6 Resultados preliminares

Para comprobar el funcionamiento de dicha memoria holográfica, se grabaron en el cristal fotorrefractivo 10 hologramas de Fourier de páginas binarias, de los cuales se muestran dos en la tabla 3.2. La decisión de exhibir solo dos de los diez, se debe al deseo de mostrar el efecto del tiempo en la calidad de las imágenes obtenidas de los hologramas; y cómo ésta afecta en la codificación y decodificación de estos. Los errores encontrados experimentalmente, fueron separados según su origen como:

Errores de bit: Cuando el promedio de los pixeles de la imagen no es debidamente discriminado por el control de sensibilidad. Este error se presentó ya que como se muestra en la tabla 3.2, la calidad de la imagen disminuye con el tiempo.

Tabla 3.2. Resultados preliminares.

	6 hrs.	24 hrs.	52 hrs.
Información Codificada			
CLAALD00			
Decodificación	CLAALD00	CLAALD0 _	ALAALD _ _
Información Codificada			
AND2SP**			
Decodificación	AND2SP**	AND2SP _ _	_ND2S _ _ _

Errores de enfoque: Cuando al hacer el promedio de los píxeles de la imagen, las áreas consideradas para cada píxel de la matriz binaria no coinciden; estos errores se deben al desenfoque de la imagen.

Errores de origen mecánico: Cuando el cristal regresa a una posición para extraer la información, este no repite la posición y por lo tanto la imagen del holograma no se recupera como se desea.

En la tabla 3.3 se muestra la presencia de estos errores al momento del desarrollo experimental; es importante mencionar que se realizaron 10 pruebas de lectura por cada día. Los errores se distinguen entre sí, ya que los del tipo mecánico se hacen notar al momento de adquirir la imagen, los de desenfoque presentan más de dos bits de error por cada vector binario y se presentan generalmente en la parte media; afectan a toda la matriz binaria y los errores de bit se presentan en los extremos y no afectan a toda la matriz sino independientemente a los vectores sobre todo en los extremos.

De esta manera se observó que experimentalmente el rendimiento de la memoria holográfica, comprobando que la automatización del sistema esta lista y que no se obtuvieron errores debidos al software de control.

Para presentar estos datos se realizaron de forma secuencial tres pruebas diarias a 20 hologramas registrados en el cristal fotorrefractivo. Y como se describió anteriormente, los errores fueron clasificados según la imagen del holograma y la decodificación de la información.

Tabla 3.3 Presencia de los errores.

Error	Día 1	Día 2	Día 3
De Bit	2 %	15 %	25 %
De Enfoque	3 %	8.5 %	10 %
Mecánico	3 %	3 %	4.5 %

En el siguiente capítulo se describe a detalle la implementación de esta memoria holográfica como dispositivo de almacenamiento de instrucciones dentro de un sistema de computadora básica; el cual realiza la operación de igualar un dato introducido por el usuario.

Referencias

- [2.1] Bayer MaterialScience AG. Nota de prensa. Leverkusen, Germany, Abril 2005.
- [2.2] H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox (Eds.). Holographic Data Storage. Berlin Heidelberg, Germany, 2000.
- [2.3] E. E. Rodríguez, H. Zúñiga, E. Tepichín. Automatic System for a Holographic Memory. CDIC'06 IEEE Proceedings, Querétaro, México, August 2006.
- [2.4] P. J. van Heerden. Theory of Optical Information Storage in Solids. Applied Optics, Vol. 2(4), pp. 393-400, April 1963.
- [2.5] P. Cheben en M. L. Calvo, *Óptica Avanzada*, Ed. Ariel Ciencia, Madrid, España (2002).
- [2.6] Datex Ohmeda Tecnología / Copyright Datex-Ohmeda, 2002
- [2.7] Newport, "Variable Attenuator / Beamsplitters," Optics Filters and Attenuators pp 643.

CAPÍTULO 4

EMULACION ELECTRO-ÓPTICA DE UNA COMPUTADORA BÁSICA (DESARROLLO EXPERIMENTAL)

4.1 Introducción

En el capítulo 2, se definió a una computadora como el sistema electrónico digital más simple, que trabaja siguiendo una secuencia de instrucciones programadas para que se realice una tarea específica. Este tipo de sistemas son la parte principal de varios dispositivos electrónicos, como las computadoras, los instrumentos de medición, los teléfonos celulares, las calculadoras, etc [4.1]. En este capítulo se describe la puesta en marcha experimental de un sistema electro-óptico que emula una computadora básica. En el cual, las instrucciones son almacenadas en una memoria holográfica [4.2] y después procesadas por una segunda versión del software de control.

En el capítulo anterior se describió la memoria holográfica implementada en este trabajo, por lo que este capítulo comienza haciendo la analogía de los componentes tradicionales del hardware y los componentes del sistema electro-óptico que en este caso emula una computadora básica.

4.2 Hardware

El esquema del sistema electro-óptico propuesto para emular una computadora básica, aparece en la fig. 4.1. En un sistema mínimo el dispositivo de entrada tiene la función de ser la interfase entre el usuario y el sistema, es decir, captura la información para que el sistema pueda interpretarla. En el sistema propuesto, el dispositivo de entrada es el teclado de la computadora; de manera que al introducir la información, ésta es instantáneamente codificada y desplegada en la pantalla LCD, gracias al software desarrollado.

Esta información es transmitida mediante la modulación del frente de onda del campo luminoso del haz objeto del sistema holográfico, hasta que es adquirida por la cámara CCD. Motivo por el cual, el sistema holográfico tiene la función análoga a la del bus de datos en un sistema digital.

La información adquirida por la cámara CCD como imagen, es procesada por la computadora. Por lo que, esta computadora hace las veces del microprocesador. Al interpretar la información, la computadora puede desplegar en la LCD la información a grabar en un cristal fotorrefractivo que ocupa el lugar del dispositivo de almacenamiento; o bien, puede modificar la posición en el espacio del cristal para realizar el multiplexado de información. El control de la posición del cristal se lleva a cabo manipulando un sistema electromecánico de posicionamiento, hecho por el cual se considera a éste como el bus de direccionamiento.

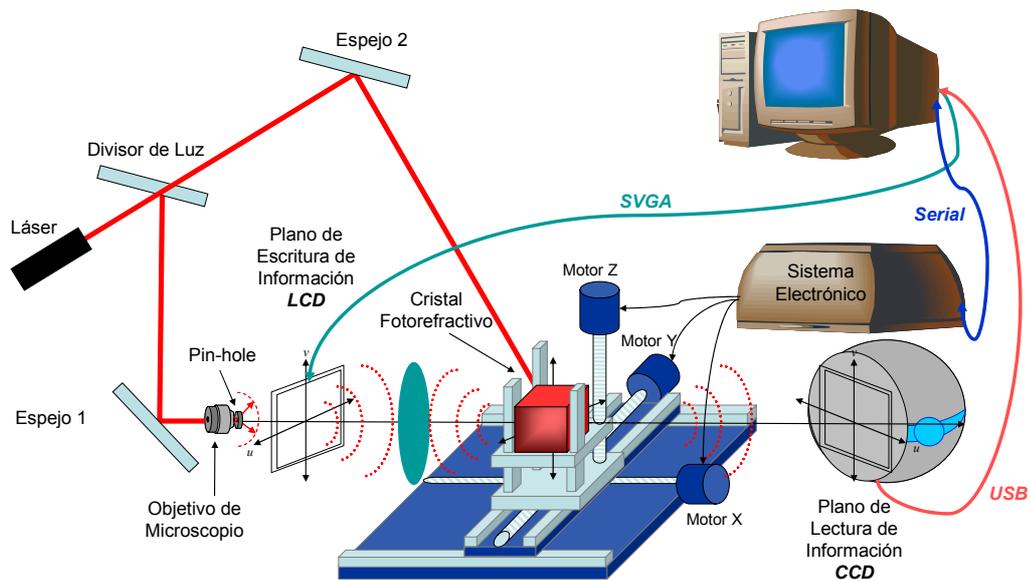


Figura 4.1. Esquema del sistema electro-óptico.

Como se ilustra en la fig. 4.1, el sistema electromecánico consiste en tres motores de pasos acoplados mecánicamente a un mecanismo de desplazamiento en tres dimensiones. Los motores de pasos son controlados mediante un circuito electrónico que mantiene una comunicación continua con la computadora. Observe que la computadora controla la LCD, la CCD y el sistema electromecánico a través de sus respectivas interfases, hecho por el cual dichas interfases son consideradas como el bus de control [4.3].

Con la descripción anterior, sólo resta por hacer la analogía entre el monitor de la computadora y el dispositivo de salida, ya que en éste se despliegan los resultados finales del proceso.

4.3 Software

Para tener la distinción correcta entre el software de control y el software de la computadora básica electro-óptica, se debe tener en cuenta

que el primero de estos ha sido diseñado para controlar tanto al sistema electromecánico de la memoria holográfica, como para realizar la codificación y decodificación de las páginas binarias y fue descrito en el capítulo anterior. Mientras que el software de la computadora básica esta conformado por el programa objeto que gobierna su funcionamiento, y el programa fuente que traduce al programa objeto a sus respectivas páginas binarias.

4.3.1 Programa objeto

El diagrama de flujo del programa objeto que fue almacenado en la memoria holográfica se muestra en la fig. 4.2 y las instrucciones que lo conforman se enlista en la tabla 4.1 [4.4].

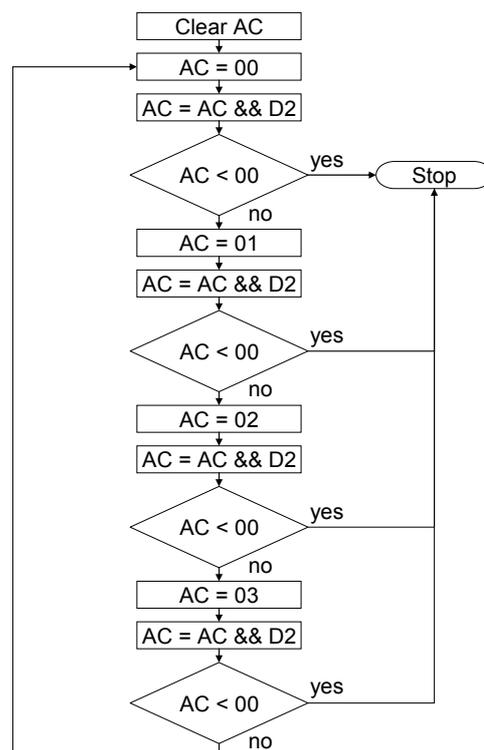


Figura 4.2. Diagrama de flujo del programa almacenado en la memoria holográfica.

Tabla 4.1. Programa propuesto.

	Instrucción	Descripción
1	CLA	Borrar el registro AC
2	LDA 00	Cargar el dato 00 en el registro AC
3	AND D2	Realizar la adición lógica entre el registro AC y el dato D2 y carga el resultado al registro AC
4	SPA	Salta la siguiente instrucción si el registro AC es positivo
5	IOF	Parar el programa
6	LDA 01	Carga el dato 01 en el registro AC
7	AND D2	Realizar la adición lógica entre el registro AC y el dato D2 y carga el resultado al registro AC
8	SPA	Salta la siguiente instrucción si el registro AC es positivo
9	IOF	Parar el programa
10	LDA 02	Carga el dato 02 en el registro AC
11	AND D2	Realizar la adición lógica entre el registro AC y el dato D2 y carga el resultado al registro AC
12	SPA	Salta la siguiente instrucción si el registro AC es positivo
13	IOF	Parar el programa
14	LDA 03	Carga el dato 03 en el registro AC
15	AND D2	Realizar la adición lógica entre el registro AC y el dato D2 y carga el resultado al registro AC
16	SPA	Salta la siguiente instrucción si el registro AC es positivo
17	IOF	Parar el programa
18	BUN	Salta la instrucción 1 y retorna a la segunda instrucción.

Como se puede observar, el objetivo de este programa es el de comprobar si el dato de entrada D2 introducido por el usuario, tiene un valor entre 00 y 03. Si el dato D2 no se encuentra en el intervalo mencionado, el programa se ejecuta cíclicamente hasta que el usuario modifique el valor de D2 y este se encuentre entre 00 y 03.

4.3.2 Programa fuente

Para convertir las instrucciones del programa fuente en páginas binarias de las cuales se almacenaran los hologramas de Fourier en el cristal fotorrefractivo, se desarrolló una segunda versión del software de control. Esta segunda versión realiza las mismas tres tareas descritas en el capítulo anterior, sólo que está diseñado específicamente para codificar las instrucciones que son enlistadas en la columna de instrucciones de la tabla de control del panel frontal mostrado en la fig. 4.3

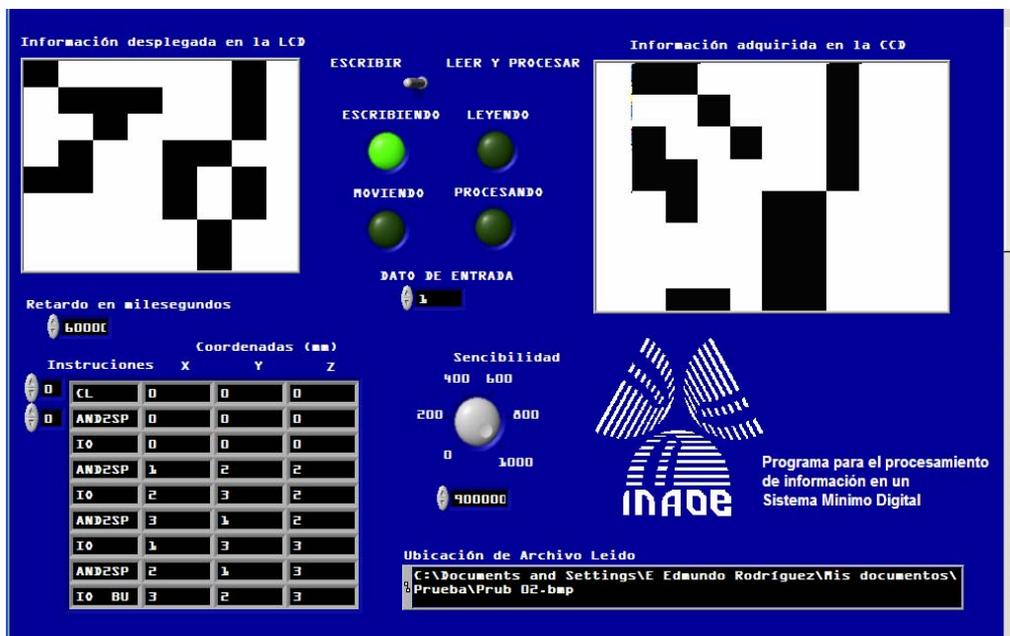


Figura 4.3 Panel frontal de programa fuente.

Si se pone atención en el panel frontal (fig. 4.3), la segunda versión del software de control cuenta con dos opciones “Escribir” y “Leer y procesar”. Si se selecciona la primera de ellas este software se encarga de llevar a cabo la tarea de programa fuente; es decir, ya que el usuario termina de escribir las instrucciones, el software transforma estas instrucciones en páginas binarias y controla al sistema electromecánico de posicionamiento para que los hologramas de estas páginas sean almacenados al interior del cristal. En la tabla 4.2, se pueden observar las codificaciones binarias de todas las instrucciones que se utilizaron en el programa fuente.

Tabla 4.2. Codificación de las instrucciones del programa objeto.

Instrucción	Codificación binaria
CLA	
LDA	
AND	
SPA	
IOF	
BUN	

La distribución de la información en cada página binaria se puede apreciar en la fig. 4.4, en donde podemos apreciar que cada página contiene dos instrucciones con sus respectivos datos a manipular.

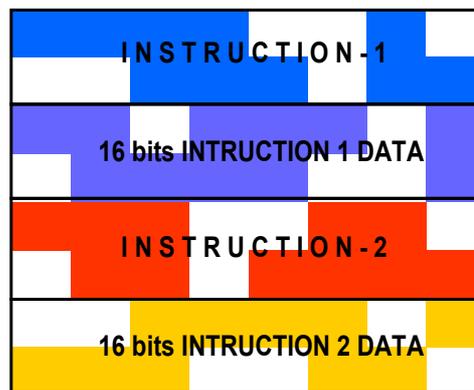


Figura 4.4. Distribución de la información en cada página binaria

Para ilustrar de manera gráfica la distribución de las páginas binarias dentro del cristal, se tiene la figura 4.5. Mientras que la codificación que realizó el programa fuente de todo el programa objeto se encuentra en la tabla 4.3.

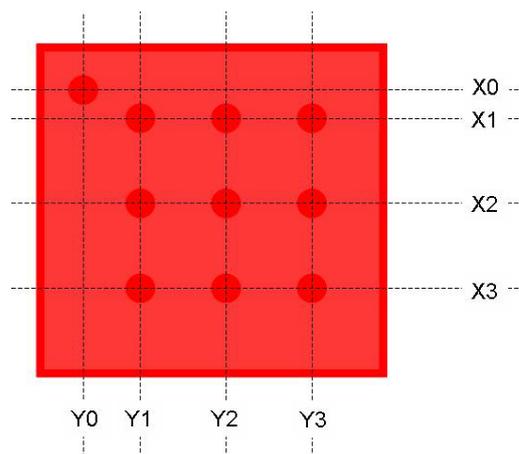


Figura 4.5 Distribución espacial de los hologramas de Fourier de las páginas binarias dentro del cristal fotorrefractivo

Tabla 4.3. Codificación del programa objeto

Instrucciones	Codificación	Localización	
CLA / LDA 00		X1 = 0.5cm	Y1 = 0.5cm
AND D2 / SPA		X2 = 1.5cm	Y1 = 0.5cm
IOF / LDA 01		X3 = 2.5cm	Y1 = 0.5cm
AND D2 / SPA		X3 = 2.5cm	Y2 = 1.5cm
IOF / LDA 02		X2 = 1.5cm	Y2 = 1.5cm
AND D2 / SPA		X1 = 0.5cm	Y2 = 1.5cm
IOF / LDA 03		X1 = 0.5cm	Y3 = 2.5cm
AND D2 / SPA		X2 = 1.5cm	Y3 = 2.5cm
IOF / BUN		X3 = 2.5cm	Y3 = 2.5cm

4.3.3 Ejecución del programa

Una vez que se tiene almacenados los hologramas de las instrucciones, el usuario puede ejecutar el programa seleccionando la opción de leer y ejecutar. Entonces al igual que en una computadora básica, el sistema se mueve para leer las instrucciones almacenadas en el cristal fotorrefractivo.

Las imágenes de salida son capturadas por la cámara CCD y después decodificadas como se describió en la última parte del software de control, sólo que en esta ocasión las instrucciones son procesadas y realizadas por la computadora [4.3, 4.4].

4.4 Resultados experimentales

Las imágenes de salida de cada página binaria registrada como holograma de Fourier dentro del cristal fotorrefractivo se pueden observar en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4. Imágenes experimentales de las páginas binarias

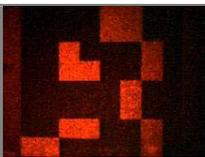
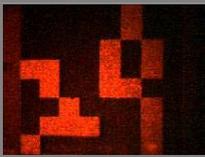
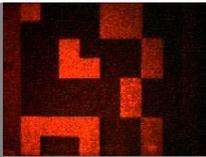
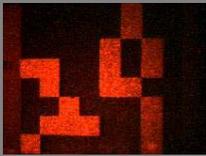
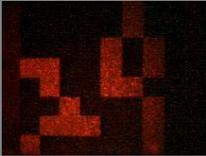
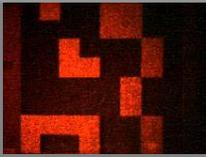
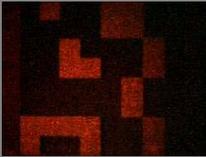
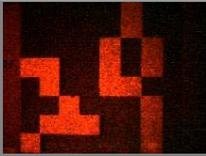
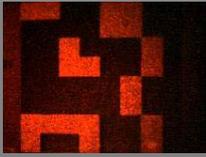
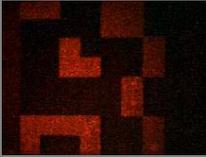
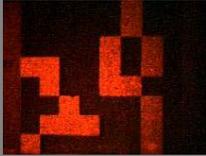
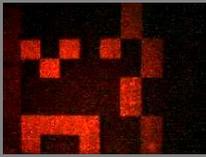
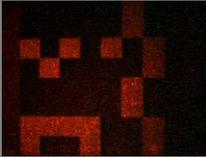
Instrucciones	Escritura	Lectura
CLA / LDA 00		
AND D2 / SPA		

Tabla 4.5. Segunda parte de las imágenes experimentales de las páginas binarias de las instrucciones del programa objeto

Instrucciones	Escritura	Lectura
IOF / LDA 01		
AND D2 / SPA		
IOF / LDA 02		
AND D2 / SPA		
IOF / LDA 03		
AND D2 / SPA		
IOF / BUN		

4.4.1 Análisis de los resultados

Como se puede observar, las imágenes de las páginas binarias, de las instrucciones del programa objeto, no se distorsionaron; sin embargo se puede apreciar el contraste de estas fue disminuyendo.

La secuencia del programa fue seguida por el sistema electro-óptico de la computadora básica hasta que la segunda versión del software control fue incapaz de hacer la distinción entre los píxeles claros y oscuros de las imágenes de salida.

Las características experimentales del arreglo del sistema se enlistan en la tabla 4.6 y en la fig. 4.6 se muestra una imagen del sistema electro-óptico diseñado para emular nuestra computadora básica.

Tabla 4.6. Características experimentales.

Potencia del LASER		25 mW
Tiempo de registro		900 s
Velocidad de desplazamiento	Ejes X y Y	2 mm / s
	Eje Z	0.7 mm / s
Tiempo de procesamiento		0.025 s

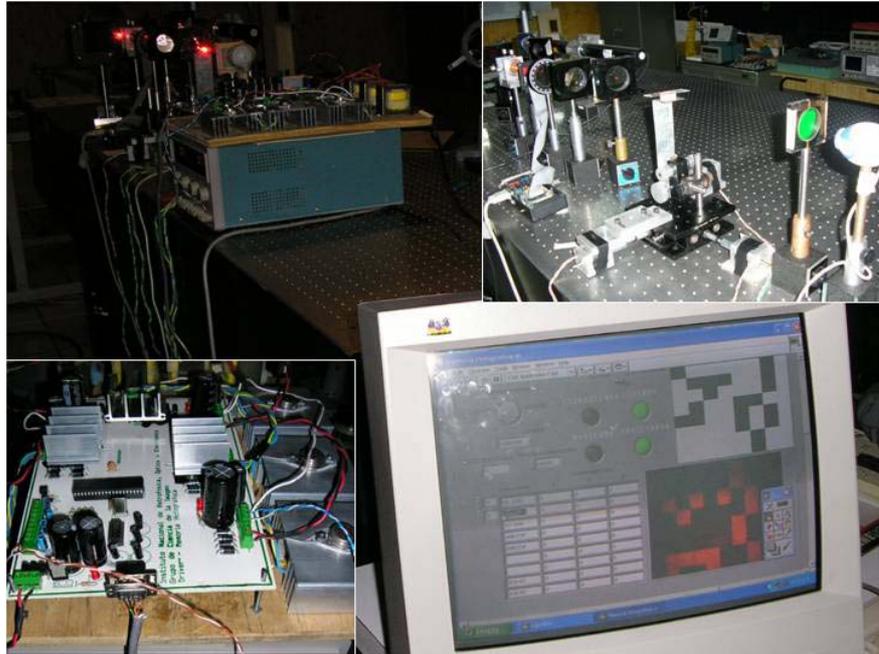


Figure 4.6. Arreglo experimental del sistema electro-óptico diseñado para emular una computadora básica.

Referencias

- [4.1] M. Morris Mano, Computer system architecture, Pearson Education, USA, 1994.
- [4.2] E. Rodríguez, H Zúñiga, E. Tepichín, Automatic system for a holographic memory, International Conference on Dynamics, Instrumentation and Control, IEEE Proceedings, México, 2006.
- [4.3] E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, E. Tepichín Rodríguez, Implementación de una memoria holográfica reconfigurable en un sistema mínimo digital, 3er Encuentro "Participación de la Mujer en la Ciencia", CIO & CIATEC, León, Guanajuato, México 2006.
- [4.4] E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, A. Castro, D. Sánchez de la Llave, E. Tepichín Rodríguez, Minimum digital system, emulated by a reconfigurable single-lens holographic memory, Optics and Photonics, Proc. SPIE Vol. 6314 p402, 63141N (2006).

CAPITULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

Se observó de manera experimental el rendimiento del dispositivo de almacenamiento holográfico de datos, automatizado gracias al software de control. Y como principal característica, cabe mencionar que no se obtuvieron errores debidos al software.

Gracias a la integración del sistema electro-mecánico y a su automatización a través del software de control, se implementó con éxito el sistema denominado memoria holográfica, no solo para almacenar y reconstruir información en forma de imágenes; sino para almacenar las instrucciones de programa objeto codificadas en forma de páginas binarias. De esta manera, en este trabajo se presenta una aplicación práctica de una memoria holográfica, en un sistema que emula lo que en electrónica se conoce como computadora básica. Quedando comprobada su aplicación en sistemas tecnológicos actuales.

Los resultados experimentales soportan nuestra propuesta de emular electro-ópticamente una computadora básica, ya que el sistema obedece a las instrucciones del programa objeto. Sin embargo debido a la disminución en el contraste de las imágenes de salida, el sistema presenta problemas horas después de que los hologramas fueron registrados en el cristal fotorrefractivo. Este fenómeno se presenta debido a que la potencia del láser implementado no es la adecuada y a que la eficiencia del cristal fotorrefractivo es baja; pero estas limitantes se pueden superar utilizando un láser más potente y un cristal fotorrefractivo más eficiente.

CAPÍTULO 6

TRABAJO A FUTURO

En este capítulo se describen los trabajos que se tienen contemplados como futuro para la continuación de esta emulación electro-óptica de una computadora básica.

6.1 Control digital para la posición de un cristal fotorrefractivo

El objetivo es optimizar un sistema electromecánico que controla la posición espacial de un cristal fotorrefractivo; aplicando un algoritmo de control de lazo cerrado que gobierne la posición y velocidad de desplazamiento del cristal mencionado.

Aunque el error de posición obtenido con este sistema es mínimo, este no es constante como para ser compensado por software; debido a que el control implementado es del tipo proporcional de lazo abierto. Dentro de este plan a futuro nuestro grupo considera desarrollar un sistema digital electro-

óptico de multiprocesadores paralelos, en el cual se implementará nuevamente este sistema electromecánico.

Se ha considerado el desarrollo de un control digital de lazo cerrado que gobierne, tanto la posición como la velocidad de desplazamiento del cristal fotorrefractivo para disminuir el error en la posición del cristal, sin importar la naturaleza de éste. Se implementaran tres encoders rotacionales absolutos, acoplados directamente a cada motor (ver fig. 6.1). Estos dispositivos retroalimentarán a un circuito electrónico de control, con la posición y la velocidad de desplazamiento del cristal; para que de esta manera al programar el circuito con un algoritmo de control, se complete el lazo cerrado y se disminuya el error.

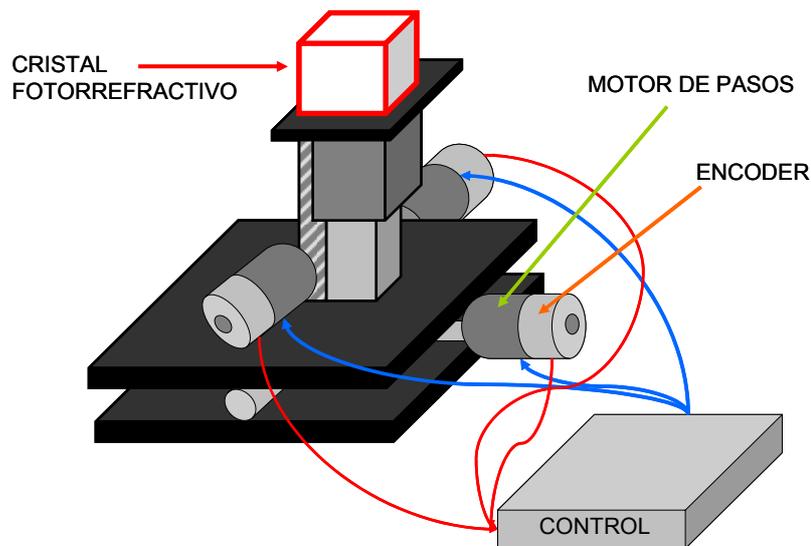


Figura 6.1. Sistema electromecánico que controla la posición del cristal fotorrefractivo a través de la retroalimentación de la posición y velocidad.

Para tener certeza de que el error es mínimo, se implementaran varios esquemas de control, para comparar los resultados y seleccionar el óptimo.

6.2 Sistema digital electro-óptico de multiprocesadores paralelos

El objetivo de este trabajo es el de desarrollar un sistema digital electro-óptico de multiprocesadores paralelos, en el cual se implementará una memoria holográfica como dispositivo de almacenamiento de instrucciones para varios sistemas digitales secuenciales conectados en paralelo.

Una vez culminado el trabajo para el desarrollo de una memoria holográfica, el grupo de ciencias de la imagen se ha dado a la tarea de implementar este dispositivo en sistemas tecnológicos actuales; tales como, sistemas digitales secuenciales. Ya que la capacidad por localidad de esta memoria es de 64 bits, se implementará para almacenar en forma de hologramas de Fourier las instrucciones que deben seguir varios sistemas digitales secuenciales conectados en paralelo. El sistema desarrollado utiliza una computadora para gobernar el sistema, pero en este trabajo se buscará eliminar esta dependencia; logrando con esto un sistema totalmente automático.

La memoria holográfica desarrollada por el grupo de ciencias de la imagen, será utilizada como memoria auxiliar, de al menos dos sistemas digitales secuenciales conectados en paralelo; es decir, en ella se almacenarán las instrucciones que dichos sistemas deben seguir en forma secuencial, como se en la fig. 6.2.

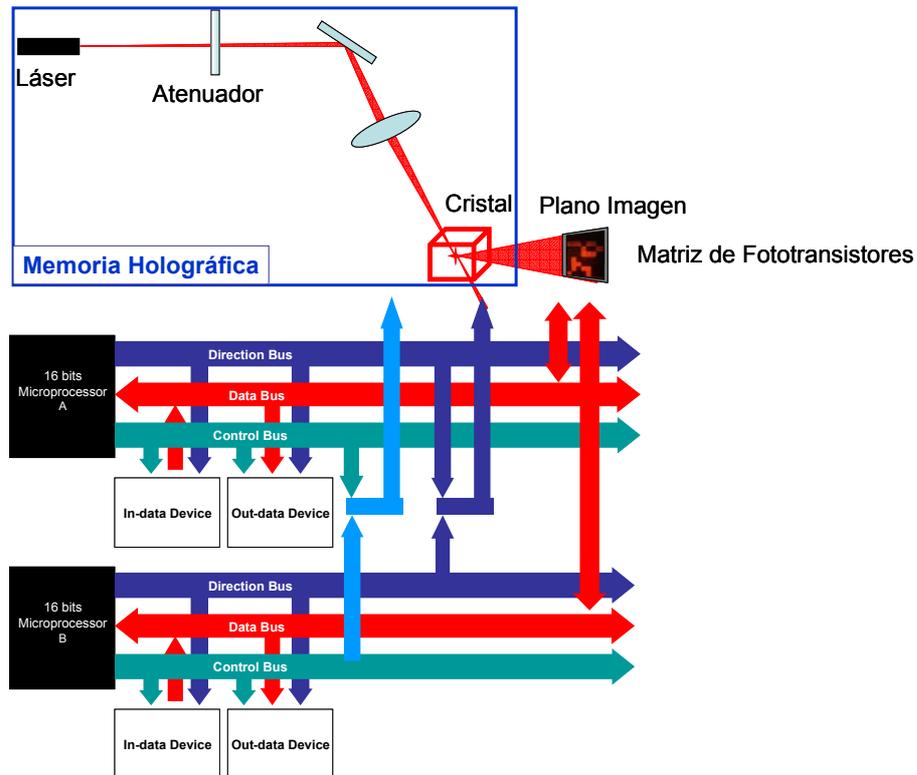


Figura 6.2. Sistema digital electro-óptico de multiprocesadores paralelos.

Las instrucciones serán almacenadas como hologramas de Fourier de páginas binarias de información, en las cuales se encontraran codificadas las instrucciones de los programas que gobiernan a los sistemas digitales paralelos.

6.3 Multicompuerta XNOR holográfica

El objetivo de este tercer trabajo es desarrollar una compuerta digital XNOR implementando la holografía como tecnología alternativa.

Se implementarán dos pantallas LCD, en las cuales se desplegarán las páginas binarias con las que se requiere hacer la operación lógica XNOR

(OR exclusiva negada). Los estados lógicos de los bits de las páginas binarias se representarán como el estado de la polarización de la luz que se emerge de cada píxel de la pantalla. Como se observa en la fig. 6.3, los haces provenientes de las pantallas interfieren justo en un cristal fotorrefractivo; de forma que el campo luminoso proveniente de cada píxel de la pantalla 1, interfiera con el campo luminoso proveniente del correspondiente píxel de la pantalla 2.

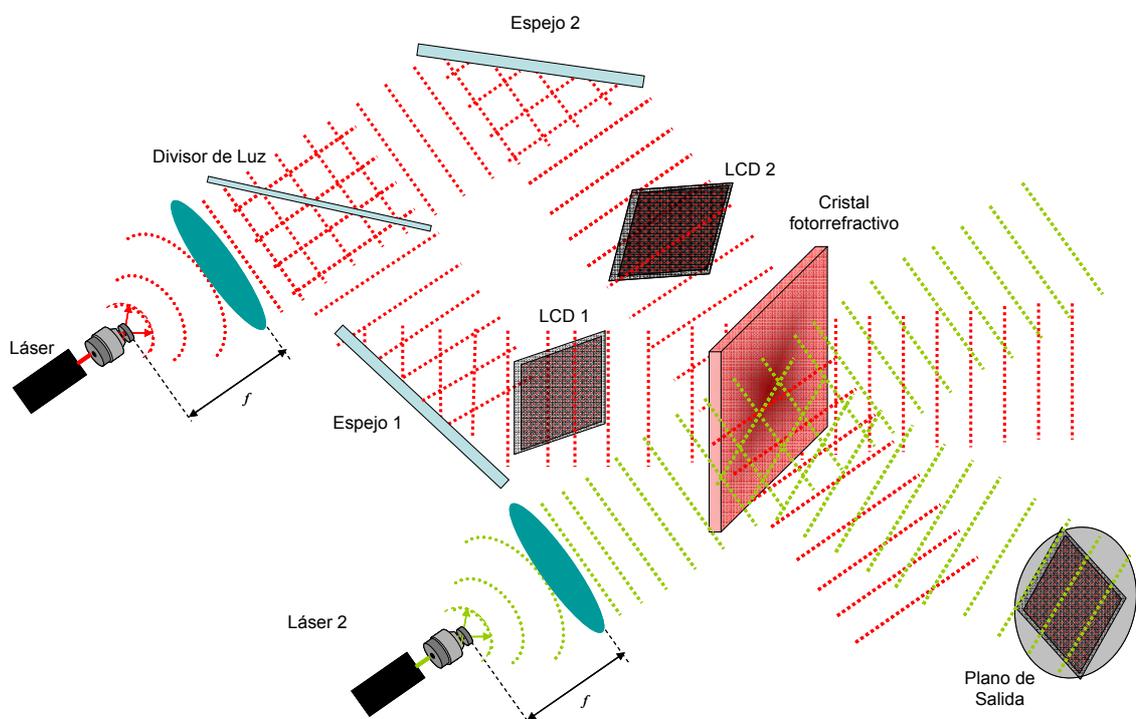


Figura 6.3. Sistema holográfico implementado como compuerta lógica XNOR.

Si dentro del cristal los campos luminosos tienen la misma polarización, se formará un patrón de interferencia que será registrado por el mencionado cristal; si la polarización no es igual el cristal no registrará nada. Por tanto cuando, sea iluminado el cristal por el láser 2, el holograma

capturado tendrá píxeles claros en las zonas donde los haces tienen polarizaciones iguales; mientras que cuando las polarizaciones sean diferentes los píxeles del holograma serán oscuros (ver fig. 6.4).

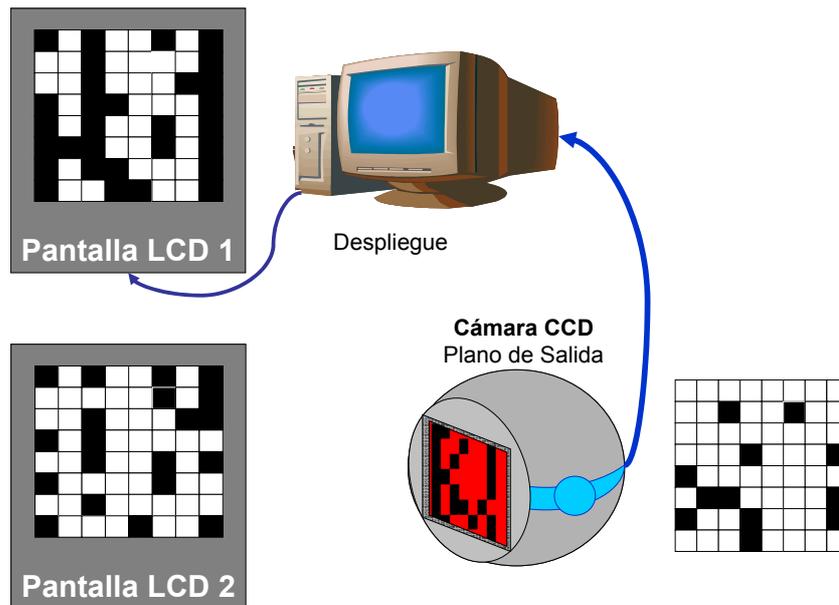


Fig. 6.4. Lógica de estados de la compuerta XNOR holográfica.

APENDICE A

Efecto Fotorrefractivo

Al iluminar un material fotorrefractivo con un patrón espacial de intensidad luminosa no homogénea, se excitan los portadores de carga libres a una razón proporcional a tal intensidad. Estos portadores se transportan de las zonas de alta intensidad donde se generan, a las regiones oscuras donde son atrapados por trampas de impurezas ionizadas. Resultando así una distribución espacial de carga no homogénea, la cual a su vez genera un campo eléctrico interno que modula el índice de refracción del material. Este efecto electroóptico lineal se conoce como efecto Pockels, y para el caso del LiNbO₃:Fe, se describe en la Fig. A.1.

En el LiNbO₃:Fe los centros de impurezas Fe²⁺ son los portadores, en este caso donadores que se convierten en Fe³⁺ por ionización y los centros Fe³⁺ son las trampas que se convierten en Fe²⁺ después de la recombinación [A1]. La modulación resultante del índice de refracción de un cristal fotorrefractivo que fue iluminado por un patrón no homogéneo de intensidad luminosa, se puede calcular como

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2} n^3 r_{eff} E_{esp}(x), \quad (A.1)$$

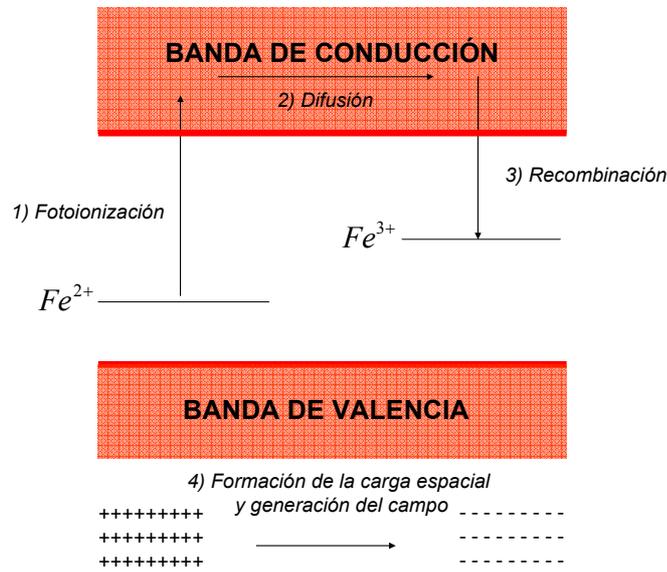


Figura A1. Efecto Pockels en el LiNbO3 [A2].

Ya que según el modelo de Vinetskii y Kukhtarev [A3] la distribución de trampas vacías y ocupadas está dada como

$$\frac{dN_{oc}}{dt} = -(\beta + qsI)N_{oc} + N_v n_e \gamma, \quad (A.2)$$

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

Gracias a la difusión, arrastre y el efecto fotovoltaico de volumen, se genera una corriente de difusión J_{dif} de cargas libres causadas por la iluminación

$$J_{dif} = e\hat{D}\nabla n_e, \quad (A.3)$$

en donde e es la carga elemental, $D = \mu_e k T / e$ el tensor de difusión, μ_e el tensor de movilidad de electrones, T la temperatura absoluta y k la constante de Boltzmann.

Sin presencia de campos externos, el proceso dominante en la mayoría de los cristales fotorrefractivos es la difusión, excepto en los ilimenes dopados con Fe³⁺ (LiNbO₃:Fe y LiTaO₃:Fe), en concentraciones mayores al 0,01%, en cuyos casos el efecto dominante es el efecto fotovoltaico de volumen.

La corriente de arrastre J_{arr} resultante de la interacción de las cargas y el campo eléctrico E . Las componentes del campo eléctrico pueden deberse al campo externo aplicado E_0 , El campo espacial producido por la redistribución de cargas E_{esp} y el campo piroeléctrico E_{pir} , esta dado por

$$J_{arr} = \sigma E = e\mu_e n_e E, \quad (A.4)$$

donde σ es el tensor de conductividad.

Por otra parte la corriente fotovoltaica J_{fv} resultante de la excitación de las cargas de las posiciones no simétricas; en las cuales gracias a la naturaleza anisotrópica del medio, los átomos vecinos ejercen fuerzas no proporcionales que las desplazan como

$$J_{fv} = \frac{1}{2} (\xi_{ijk} E_j^* E_k + \xi_{ijk}^* E_j E_k^*), \quad (A.5)$$

donde ξ^{ij} es el tensor fotovoltaico de volumen, E_j y E_k son las componentes del campo incidente de luz.

De acuerdo con la ley de la continuidad, gracias a las variaciones espaciales de corriente $J = J_{dif} + J_{arr} + J_{fv}$, se crea un patrón espacial de densidad de carga ρ [A3] dado por,

$$\nabla \cdot J + \frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (A.6)$$

Dicha densidad de carga en un material fotorrefractivo con constante dieléctrica ϵ_0 y tensor dieléctrico ϵ , induce un campo de carga espacial interno E_{sc} vía la ecuación de Poisson, cuya expresión matemática es

$$\nabla \cdot (\epsilon E_{sc}) = \frac{1}{\epsilon_0} \rho(x) \quad (A.7)$$

Si se registra en el cristal una red sinusoidal, como la generada por un patrón de interferencia de intensidad

$$I = I_0 [1 + m \cos(Kz)] \quad (A.8)$$

donde I_0 es la intensidad media, $m = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$ es la visibilidad del patrón de interferencia. I_{max} e I_{min} son las intensidades en las regiones de máxima y mínima intensidad luminosa, $K = 2\pi/\Lambda$ es el módulo del vector de la red; se obtiene el primer armónico del campo espacial estacionario como [A4]:

$$E_{esp} = -m [R(I)E_0 + E_{fv} + jR(I)E_{dif}] \quad (A.9)$$

donde $E_{dif} = kTK/e$ es el campo de difusión, $E_{fv} = \kappa N_{oc} I_0 / (e \mu_e n_e, 0)$ es el campo fotovoltaico $\kappa = J_{fv} / (N_{oc} I_0)$ el coeficiente fotovoltaico de volumen, $n_e, 0 = n_e(I = I_0)$, y $R(I) = [1 + \beta / (qsl_0)]^{-1}$ es el factor de reducción, que se considera experimentalmente

como $R=1-\sigma_l/\sigma_l$, siendo σ las conductividades del cristal en la oscuridad y bajo una iluminación intensa. Para iluminaciones altas $R \sim 1$ [A5].

La deriva espacial que aparece en la ecuación A.7 es muy importante para el efecto fotorrefractivo, ésta es el origen de la respuesta no lineal del material fotorrefractivo, conocida como desfase Θ entre la modulación del índice de refracción y la distribución de la intensidad de luz inicial [A6] (ver Fig. A.2)

$$\Theta = \tan^{-1} \left[\frac{E_{dif} E_q + E_0^2}{E_0 E_q} \right], \quad (A.10)$$

donde, E_0 es el campo eléctrico externo aplicado (DC), y E_q es el campo eléctrico de saturación, que se calcula $E_q = eNT/k\epsilon\epsilon_0$ donde N_T es la densidad efectiva de trampas.

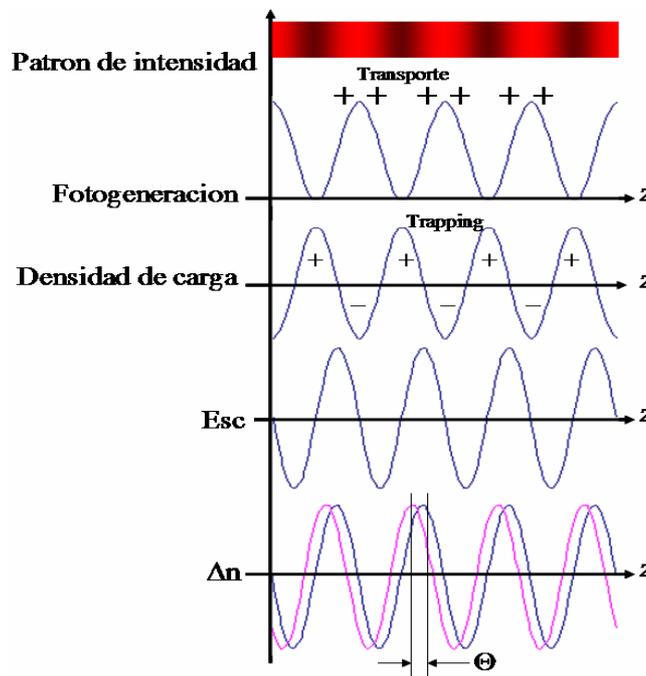


Figura A.2. Reacciones físicas presentadas durante el efecto fotorrefractivo.

Entonces como se habia planteado en un principio el campo de carga espacial interno $E_{\text{esp}}(x)$, crea una modulación del índice de refracción $\Delta n(x)$ de acuerdo con el efecto electro-óptico lineal [A6].

$$\Delta n(x) = -\frac{1}{2} n^3 r_{\text{eff}} E_{\text{esp}}(x), \tag{A.1}$$

Referencias

- [A1] D. Mayorga, *Corrientes inducidas en cristales fotorrefractivos por patrones de luz oscilantes*, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (1999).
- [A2] Naval Research Laboratory, Center for Computational Materials Science, <http://cst.www.nrl.navy.mil/lattice/struk/LiNbO3f.html>
- [A3] V. L. Vinetskii, N. V. Kukhtarev, *Sov. Physics Solid State*, 16, 2414 (1975).
- [A4] P. Cheben en M. L. Calvo, *Óptica Avanzada*, Ed. Ariel Ciencia, Madrid, España (2002).
- [A5] J. C. Ramírez, *Procesos holográficos en polímeros fotorrefractivos*, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México (2000).
- [A6] A. E. Jara, J. E. Alfonso, J. R. Arévalo, *Holografía en cristales fotorrefractivos ($Bi_{12}SiO_{20}$ y $LiNbO_3$)*, *Revista Colombiana de Física*, Vol.35, No 2 (2003).

APENDICE B

Holografía

La intensidad de la interferencia de dos ondas varía de forma senoidal con la diferencia de fase entre esas dos ondas en cada punto del espacio. Los planos de intensidad constante son un conjunto de planos paralelos, ortogonales al plano definido por los vectores de propagación de las dos ondas de registro y que contienen a la dirección de la bisectriz del ángulo que forman estos dos vectores de onda. Estos planos también definen por tanto los puntos donde las características ópticas del material toman un mismo valor [B1].

En el caso de que se produzca la variación o modulación sinusoidal del índice de refracción se habla de redes holográficas de fase, cuando se produzca la modulación de la conductividad, se habla de redes de amplitud; se consideran redes mixtas aquellas en las que ambos parámetros están modulados.

Apoyándose en el sistema interferométrico de la figura B.1 se explicará cómo es que se registra un holograma para después ser leído. Identificando a los haces provenientes de objeto y de la referencia como

$$\mathbf{E}_1 = E_1 e^{j(k_1 r + f_{\text{objeto}})}, \text{ haz objeto y} \quad (\text{B.1})$$

$$\mathbf{E}_2 = E_2 e^{j(k_2 r)}, \text{ haz de referencia.} \quad (\text{B.2})$$

Tenemos que en el punto de intersección donde se encuentra la película holográfica el campo luminoso es

$$\mathbf{E}_T = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = E_1 e^{j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} + E_2 e^{j(k_2 r)}. \quad (\text{B.3})$$

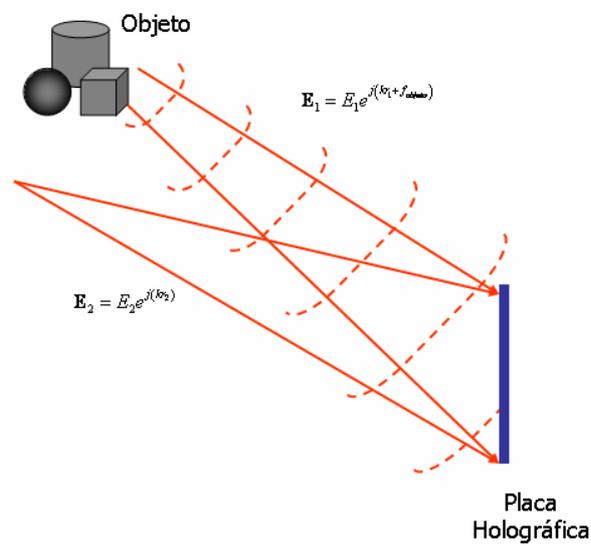


Figura B.1. Sistema interferométrico para la fabricación de un holograma.

Entonces la distribución de intensidad que se registra en dicha película esta definida como

$$I_T = |\mathbf{E}_T|^2 = \left| E_1 e^{j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} + E_2 e^{j(k_2 r)} \right|^2,$$

$$I_T = E_1^2 + E_2^2 + E_1 E_2 e^{j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} e^{-j(k_2 r)} + E_1 E_2 e^{-j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} e^{j(k_2 r)}. \quad (\text{B.5})$$

Para observar la imagen registrada en el holograma, éste se ilumina con el haz de referencia, y entonces se tiene que el campo después de la placa holográfica es

$$\mathbf{E}_2 I_T = (E_1^2 + E_2^2) E_2 e^{j(k_2 r)} + \left\{ E_1 E_2 e^{j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} e^{-j(k_2 r)} \right\} E_2 e^{j(k_2 r)} + \left\{ E_1 E_2 e^{-j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} e^{j(k_2 r)} \right\} E_2 e^{j(k_2 r)}$$

$$\mathbf{E}_2 I_T = (E_1^2 + E_2^2) E_2 e^{j(k_2 r)} + E_1 E_2^2 e^{j(k_1 r + f_{\text{objeto}})} + E_1 E_2^2 e^{-j(k_1 r + f_{\text{objeto}} - 2k_2 r)}. \quad (\text{B.6})$$

En donde se puede observar que el segundo término es proporcional al haz objeto (ver Fig. B.2).

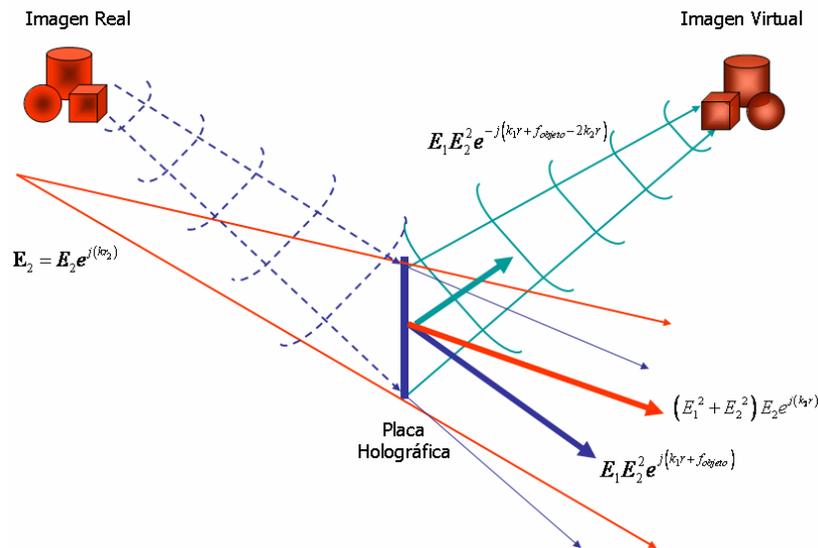


Figura B.2. Reconstrucción de la imagen holográfica.

Como se mencionó anteriormente, cuando se registra la interferencia de dos ondas en un medio holográfico, se modifican algunas de sus propiedades ópticas como lo son la conductividad y/o el índice de refracción que pasan a ser proporcionales a la intensidad registrada. En función de la relación existente entre el valor del periodo de la red y el espesor del material en el que se registra esta

red, se distingue entre hologramas delgados y hologramas de volumen. Estos dos tipos de estructuras periódicas presentan un comportamiento claramente diferente al ser iluminados por una onda electromagnética [B2].

En una red de volumen, como la separación de los planos en los que la intensidad de registro es constante es mucho menor que el espesor de la emulsión, la red periódica registrada está formada por un conjunto de planos paralelos como los que se ilustran en la figura B.3.

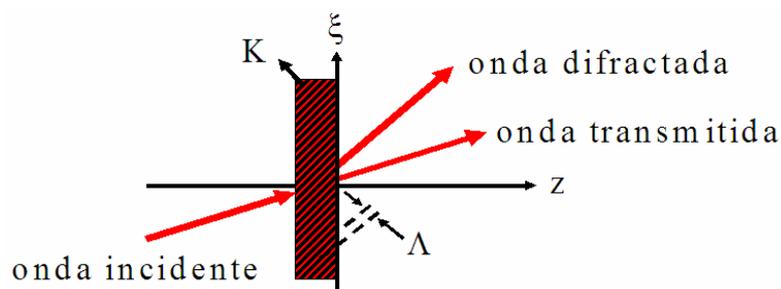


Figura B.3. Luz Difractada por Una Red Holográfica de Volumen

En este caso, sólo para un rango limitado de direcciones de incidencia se obtiene luz a la salida difractada en una dirección distinta a la de la onda incidente, es decir, sólo existe un orden difractado. Las condiciones de difracción son más restrictivas porque ahora se debe de producir la interferencia constructiva de la luz dispersada por un conjunto de planos. Para este tipo de hologramas se obtiene una eficiencia difractivas de hasta el 100% en el caso de registro de fase [B3].

Las redes de volumen, quedan definidas por la distancia entre planos en los que el índice es constante y el vector normal a dichos planos que recibe el nombre de vector de la red que aparece representado en la figura B.3. En estas redes la conductividad y la constante dieléctrica del medio son función de la posición de la red dada por

$$\sigma(r) = \sigma_0 + \Delta\sigma \cos\{K \cdot r\}, y \quad (\text{B.7})$$

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \cos\{K \cdot r\}. \quad (\text{B.8})$$

donde: σ_0 y ε_0 son los valores medios de la conductividad y la constante dieléctrica del medio [B4].

El sistema óptico que se implementó para la grabación de los hologramas de las páginas binarias, se muestra en la figura B.4.

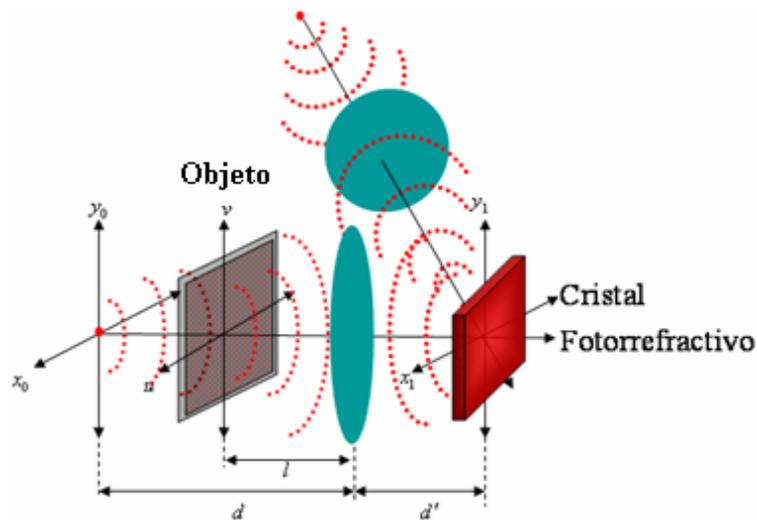


Figura B.4. Sistema implementado para grabar los hologramas en el cristal fotorrefractivo

Las distancias d y l se relacionan con d' y l' , con la ley de Gauss de manera que en la práctica éstas resultan ser

$$f = 20\text{cm}, \quad (\text{B.9})$$

$$d = 40\text{cm}, \quad (\text{B.10})$$

$$l = 30\text{cm}, \quad (\text{B.11})$$

$$d' = \frac{fd}{d-f} = 20\text{cm} \quad , y \quad (\text{B.12})$$

$$l' = \frac{fl}{l-f} = 60\text{cm} \quad . \quad (\text{B.13})$$

Apoyándose en la teoría de difracción se sabe que el plano de Fourier es el plano conjugado del plano donde está colocada la fuente puntual que ilumina el objeto (ver Fig. B.4), y es precisamente en ese plano donde se encuentra colocado el cristal fotorrefractivo de manera que este tipo de holograma registrado se le conoce como holograma de la transformada de Fourier; ya que el campo luminoso del haz objeto llega al medio de registro holográfico, tiene la forma de la transformada de Fourier del Objeto colocado entre la fuente y el lente [B5]. Como se explicó anteriormente, al iluminar el holograma con el haz de referencia como se muestra en la figura B.5; el haz difractado que sale del cristal forma la imagen del objeto a una distancia $l'-d'$ del cristal fotorrefractivo.

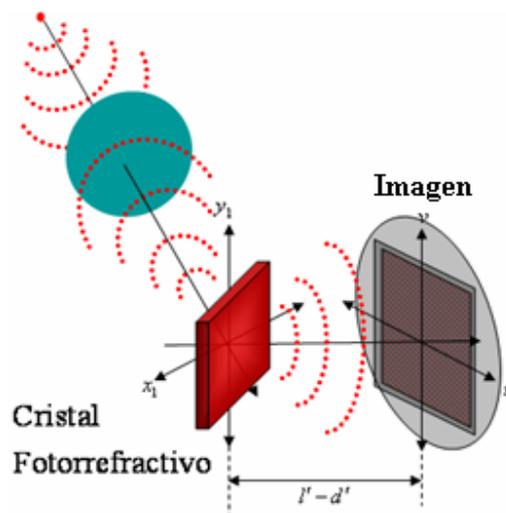


Figura B.5. Sistema implementado para observar el holograma

Referencias

- [B1] Hech, *Óptica*, Addison Wesley 2000.
- [B2] M.L. Calvo, *Óptica Avanzada*, Ariel Ciencia 2002.
- [B3] A. E: Jara, *Holografía en Cristales Fotorrefractivos*, Universidad Distrital de Bogotá.
- [B4] A. M. López y M. Quintanilla, *Redes Holográficas de Volumen*, Escuela Universitaria Politécnica de Teruel.
- [B5] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Mc Graw Hill, Second Edition 1996.

APENDICE C

Cristal $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$

Allá por 1966 en los laboratorios Bell, Ashkin y sus colaboradores observaron cambios en el índice de refracción inducidos ópticamente en cristales ferroeléctricos de LiNbO_3 y LiTaO_3 [C1]. Dos años después Chen et al [C2], sugirieron que este fenómeno, llamado efecto fotorrefractivo, podría tener aplicaciones interesantes; como por ejemplo el almacenamiento holográfico de datos; tarea para la cual el LiNbO_3 presenta significativas ventajas, con respecto a los demás materiales fotorrefractivos.

Los cristales fotorrefractivos más estudiados son los ferroeléctricos, las selenitas y los semiconductores [C3]. El LiNbO_3 pertenece al grupo de los cristales ferroeléctricos. Estos presentan una polarización espontánea, debida a que en el estado ferroeléctrico los centros de carga negativa no coinciden con los centros de carga positiva; por lo que se crea un momento bipolar aun en ausencia de campos eléctricos externos. Esta característica que tecnológicamente se aprovecha para registrar en este tipo de cristales, distribuciones no homogéneas de luz como las causadas por la interferencia de dos haces.

Dentro de los cristales ferroeléctricos los más comunes son los óxidos ferroeléctricos. Quienes tienen un elevado coeficiente electro-óptico r_{eff} a temperaturas ambiente; hecho que los hace tener un elevado índice Q de eficiencia refractiva dado por

$$Q = n^3 \frac{r_{eff}}{\varepsilon}, \quad (C.1)$$

donde n es el índice de refracción y ε es la permitividad dieléctrica [C4].

Los cristales ferroeléctricos se dividen de acuerdo a su estructura cristalina en tres subgrupos: ilmenites, perovskites y bronce tungsteno [C5]. Los cristales ilmenites tienen una simetría hombohedral a temperatura ambiente. El elemento más común en este tipo de cristales es la ilimenita (FeTiO_3). Ejemplos de estos cristales fotorrefractivos son el LiNbO_3 y el LiTaO_3 . Los ilmenites se caracterizan por tener una alta conductividad oscura, lo cual es muy útil para generar rejillas fotorrefractivas en la oscuridad [C6].

El LiNbO_3 es sin duda el cristal fotorrefractivo más estudiado en la actualidad; ya que gracias a sus buenas propiedades holográficas, se han desarrollado una gran cantidad de aplicaciones tecnológicas con este cristal. En este tipo de cristal, tanto el rango dinámico como la sensibilidad pueden controlarse mediante dopantes como Fe , Cu , Mn , Zn (ver Fig. C.1); esto en gran parte se debe a que la tecnología desarrollada para fabricar estos cristales dopados tiene una excelente calidad óptica.

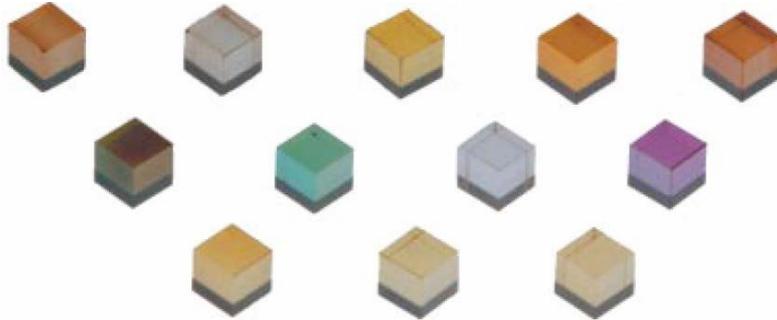


Figura C.1. Cristales LiNbO₃ dopados [C7]

Izquierda a derecha renglón superior: Fe:Ce, Ce, Ni, Cu, Fe.

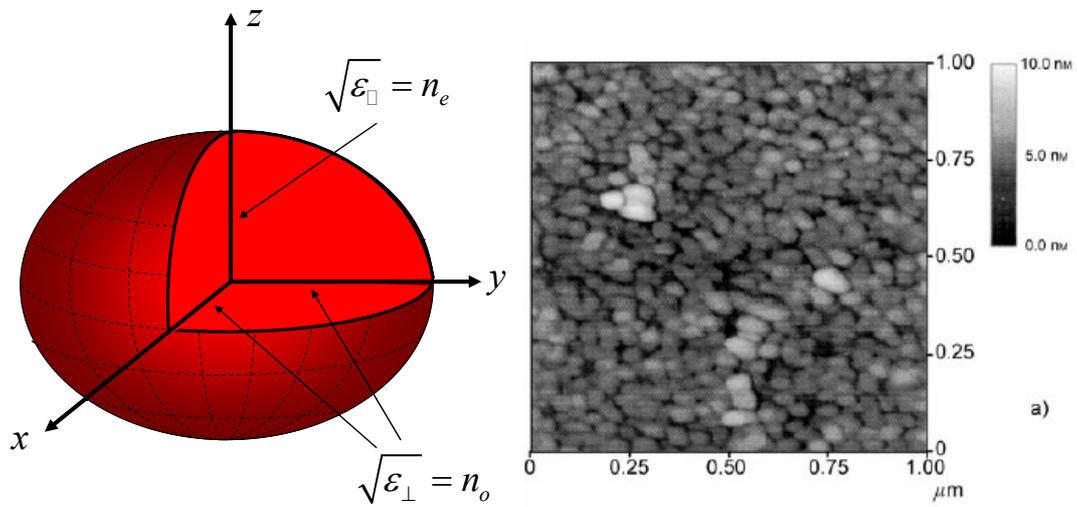
Renglón de en medio: Fe:Cr, Cr, Tb, Co.

Renglón inferior: Fe:Mn, Mn, Rh.

El LiNbO₃ es un cristal del tipo uniaxial negativo, ya que su índice de refracción ordinario es mayor que su índice extraordinario ($n_o > n_e$). Sus índices de refracción y permitividades dieléctricas se enumeran en la tabla C.1 [C8]. La Fig. C.2 muestra tanto la elipse de índices del LiNbO₃, como su estructura molecular, a demás una fotografía AFM de su superficie [C9].

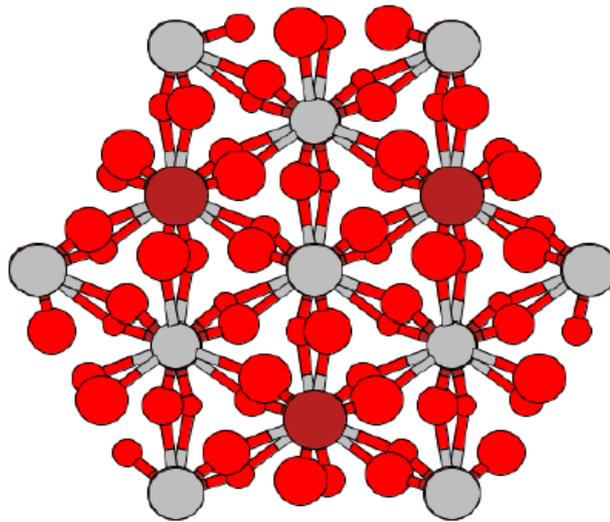
Índice de refracción	Constantes dieléctricas
$n_o = 2,322$	$\epsilon_{\square} = 5,392$
$n_e = 2,234$	$\epsilon_{\perp} = 4.990$

Tabla C.1. Tabla del los índices de refracción y permitividades dieléctricas del LiNbO₃ [C8]



a) Elipsoide de índices.

b) Fotografía AFM [C9].



c) Estructura molecular [C10].

Figura C.2. Características del LiNbO_3 .

Suponiendo que una onda luminosa cuyo vector de propagación es \hat{u} , se encuentra viajando a través de un cristal de LiNbO_3 ; esta onda se encontrará a su paso con el elipsoide de índices como se ilustra en la Fig. C.3.

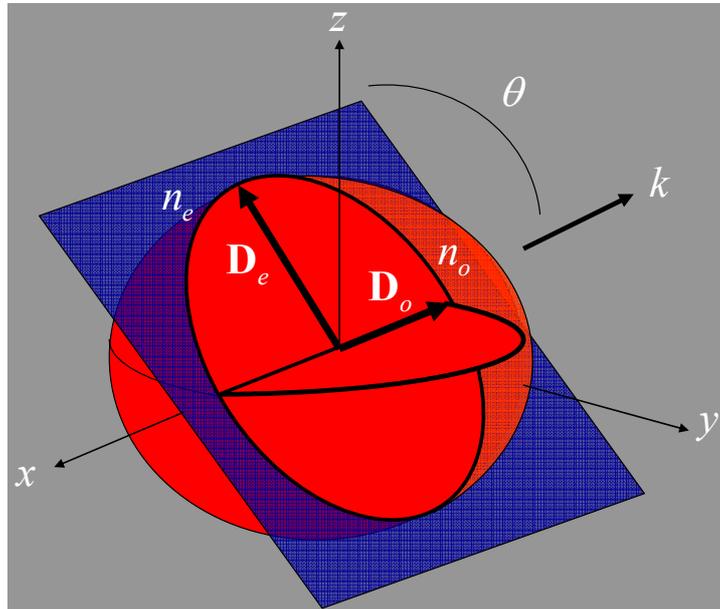


Figura C.3. Interacción de una onda luminosa con un elipsoide de índices.

Como se puede apreciar, el índice de refracción que la onda luminosa encontrará en su camino, depende de su polarización y del ángulo de incidencia θ con respecto al eje extraordinario. En el caso particular del LiNbO_3 , la relación entre el ángulo θ y el índice de refracción extraordinario está dada como

$$n_e(\theta) = \sqrt{\frac{n_o n_e}{n_e \sin \theta + n_o \cos \theta}} = \sqrt{\frac{(2,322)(2,234)}{2,234 \sin \theta + 2,322 \cos \theta}}, \quad (\text{C.2})$$

En la Fig. C.4, se encuentra graficado el parámetro σ , definido como la diferencia de índices ortogonales ($\sigma = n_e(\theta) - n_o$).

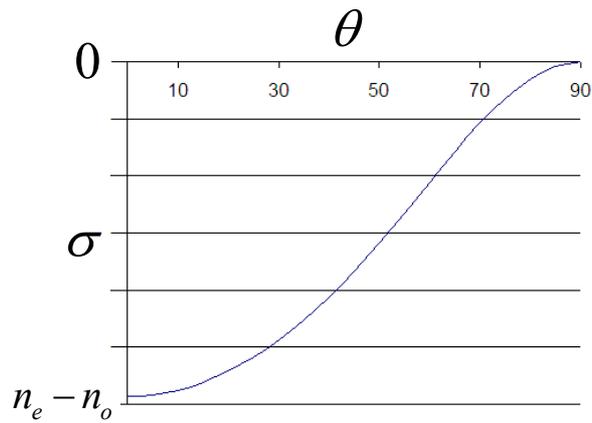


Figura C.4. Gráfica de la diferencia de índices contra el ángulo θ .

Algunos autores consideran al LiNbO_3 como un cristal isótropico [C5], ya que el máximo valor de σ es -0.088; y para algunas aplicaciones esta diferencia de índices es insignificante.

Referencias

- [C1] A. Ashikin, G. D. Boyd, J. M Dzedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levenstein, K. Nassau, *Optically induce refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃*, Applied. Physics. Lett 9, 72 (1966).
- [C2] F. S. Chen, J. T. LaMacchia, B. D. Fraser, *Optically induced refractive index inhomogeneties in LiNbO₃ and LiTaO₃*, Applied Physics. Lett 13, 223 (1968).
- [C3] P. Cheben en M. L. Calvo, *Óptica Avanzada*, Ed. Ariel Ciencia, Madrid, España (2002).
- [C4] A. M. Glass. J. Starit, *The photorefractive effect in semiconductors*, in P. Gunter, J.P. Huignard (eds), *Photorefractive Materials and Their Applications I*, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1989).
- [C5] R. Ramos, *The role of multiple trapping centers in photorefractive barium titanate*, University of London (1997).
- [C6] D. Von der Linde, A. M. Glass, *Photorefractive effects for reversible holographic storage of information*, Applied Physics, 8, 85 (1975).
- [C7] D. K. McMiller, T. D. Hudson, J Wagner, J. Singleton, *Holographic recording in specially doped lithium niobate crystals*, Optics Express Vol 2, No. 12 (1998).
- [C8] J. M. Cabrera, F. A. López, F. J. López, *Óptica electromagnética Vol. II: Materiales y aplicaciones*, Ed. Addison Wesley, Madrid, España (1999).
- [C9] C. D. Pinheiro, V. Bouquet, F. M. Pontes, E. R. Leite, E. Longo, *Estudo do comportamentó óptico-estrutural do LiNbO₃ (Optical-structural behavior study of LiNbO₃)*, Cerámica 49, Brasil (2003).
- [C10] Naval Research Laboratory, Center for Computational Materials Science, <http://cst.www.nrl.navy.mil/lattice/struk/LiNbO3f.html>

APENDICE D

Lista de trabajos

Resúmenes

H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, G. Ramírez Zavaleta, E. Tepichín Rodríguez

Sistema óptico dinámico implementado para la formación de hologramas de Fourier en un cristal fotorrefractivo de LiNbO₃:Fe

XLIX Congreso Nacional de Física, XIX Reunión Anual de Óptica
SMF-DO & AMO, San Luís Potosí, SLP, México (2006).

H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, G. Ramírez Zavaleta, E. Tepichín Rodríguez

Memoria holográfica dinámica, implementada como dispositivo de almacenamiento de información en un sistema mínimo

XLIX Congreso Nacional de Física, XIX Reunión Anual de Óptica
SMF-DO & AMO, San Luís Potosí, SLP, México (2006).

E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, A. Castro, D. Sánchez de la Llave, E. Tepichín Rodríguez

Minimum digital system, emulated by a reconfigurable single-lens holographic memory

Optics and Photonics,
SPIE, SPIE proceedings, San Diego, California, USA (2006).

H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, E. Tepichín Rodríguez

Memoria holográfica reconfigurable de una lente

3er Encuentro "Participación de la Mujer en la Ciencia"
CIO & CIATEC, León, Guanajuato, México (2006).

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

Trabajos en extenso para memorias de congresos

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

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

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

Proceedings

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

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

H. J. Zúñiga Osorio, E. E. Rodríguez Vázquez, E. Tepichín Rodríguez
Memoria holográfica reconfigurable dinámica
XX Congreso Interuniversitario de Electrónica, Computación y Eléctrica
IEEE México & ITSON, IEEE proceedings, Cd. Obregón, Sonora, México
(2006).

E. E. Rodríguez Vázquez, H. J. Zúñiga Osorio, E. Tepichín Rodríguez
Codificación binaria de información para una memoria holográfica
XX Congreso Interuniversitario de Electrónica, Computación y Eléctrica
IEEE México & ITSON, IEEE proceedings, Cd. Obregón, Sonora, México
(2006)