

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
"Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez"

"CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PDLC"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO
EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
PRESENTA:

JOSÉ FABIÁN VILLA MANRÍQUEZ

ASESOR:

Dr. Mauricio Ortiz Gutiérrez
Profesor Investigador de la Facultad de
Ciencias Físico Matemáticas UMSNH

COASESOR:

Dr. Mario Pérez Cortés
Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Yucatán

Diciembre de 2012

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
"Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez"

"CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PDLC"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO
EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
PRESENTA:

JOSÉ FABIÁN VILLA MANRÍQUEZ

ASESOR:

Dr. Mauricio Ortiz Gutiérrez
Profesor Investigador de la Facultad de
Ciencias Físico Matemáticas UMSNH

COASESOR:

Dr. Mario Pérez Cortés
Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Yucatán

Dedicatoria

Para los seres maravillosos que Dios me dió: Mis padres Guillermo Villa y Maria de los Ángeles Manríquez que me brindaron la grandiosa oportunidad de estudiar y siempre me dieron palabras de aliento y superación, por sus consejos, sus regaños apoyándome en todas mis decisiones sin exigirme nada.

A mis hermanos Lennin, Miguel y Daniel por su gran apoyo.

A mis sobrinos Kevin, Alan y Emiliano por los momentos de felicidad que me han dado estos angelitos.

Y por todos aquellos que me quieren mil gracias.

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido terminar mi carrera y por haberme dado las cualidades y defectos que tengo.

A toda mi familia, que se sienten orgullosos de mí.

A mi asesor el Dr. Mauricio Ortiz Gutiérrez por haberme permitido trabajar con él, en el laboratorio de óptica, por sus enseñanzas, sus consejos y por su gran ayuda en la elaboración de esta tesis, ya que sin el esto no sería posible. Gracias por la confianza que me dió y por su gran amistad.

Al Dr. Mario Pérez Cortés por el material proporcionado y por sus aportes para la elaboración de esta tesis.

A mis grandes amigos: Miriam, Cristina, Rosa, Omar, Gabriel, Pablo, Ángel y Alan y por todos mis compañeros de la generación 2005 que me falta mencionar, que contribuyeron de alguna forma en mi formación académica y formaron parte de mi vida, mil gracias.

A los compañeros del laboratorio de holografía.

Y a todos mis maestros de la facultad que contribuyeron en mi formación académica gracias.

A los Dres. Mary Carmen Montserrat Peña Gomar, Gonzalo Viramontes Gamboa, Luis Mariano Hernández Ramírez y Rafael Gonzales Campos por ser mis sinodales y por aportar críticas e ideas a esta tesis.

Índice

1. Introducción	10
1.1. Dispositivos PDLC	10
1.2. Efectos electroópticos	12
1.3. Materiales cromogénicos	12
1.3.1. Cromogénicos activos eléctricamente	13
1.4. Objetivo general	13
1.4.1. Objetivos específicos	13
1.5. Estructura de la tesis	15
2. Teoría de dispositivos de cristal líquido	16
2.1. Tipos de cristal líquido y su clasificación	16
2.2. Cristales líquidos termotrópicos	17
2.2.1. Fase nemática	17
2.2.2. Fase esmética	18
2.2.3. Fase colestérica	20
2.3. Cristales líquidos liotrópicos	21
2.4. Polímeros de cristal líquido	22
2.5. Eje director	23
2.6. Birrefringencia en el cristal líquido	24
2.7. Elipsoide de índices de refracción	26
3. Materiales, descripción física y química de los materiales a emplear	30
3.1. Norland optical adhesive N°65 (NOA 65)	30
3.2. Cristal violeta de genciana	32
3.3. Características físicas de los cristales líquidos nemáticos	34
4. Construcción y caracterización del dispositivo	36
4.1. Dispersión de la luz en un PDLC	36
4.2. Fabricación de un PDLC	37
4.3. Fabricación de un HPDLC	41
4.4. Caracterización del dispositivo HPDLC	41
4.4.1. Grabado de rejillas de difracción	45
4.4.2. Eficiencia de difracción	46

4.5. Resultados	50
4.6. Hologramas de Fourier en HPDLC	54
4.6.1. Hologramas de Fourier	54
5. Conclusiones	60

Construcción y Caracterización de un PDLC

Por:

José Fabián Villa Manríquez

Resumen

En esta tesis se presenta la construcción y caracterización de un Polymer dispersed liquid crystal (PDLC) que en español es Cristal líquido disperso en polímeros, con el polímero fotosensible Norland Optical Adhesive N° 65 (NOA 65) y cristal líquido nemático E7 y de un Holographic polymer dispersed liquid crystal (HPDLC) que en español es Hologramas en cristal líquido disperso en polímeros, con el polímero Norland Optical Adhesive N° 65 (NOA 65) mezclado con cristal violeta de genciana (CVG) y cristal líquido nemático E7, el cual se ha demostrado que es un dispositivo eficiente para el grabado de información, con el cual podemos modular el esparcimiento de la luz aplicando un potencial de corriente alterna, este dispositivo es fácil de fabricar y no requiere de proceso de revelado.

En este material se graban rejillas holográficas y se caracteriza midiendo la eficiencia de difracción con respecto al voltaje aplicado y la transmitancia aplicándole voltaje. También se graban hologramas de Fourier.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Dispositivos PDLC

El descubrimiento de los cristales líquidos data del año de 1888. El botánico austríaco Friedrich Reinitzer fue el primero en descubrir este fenómeno: él encontró que el benzoato de colesterol, presentaba ciertas características ópticas al variar la temperatura de dicho material. Esta variación la clasificó en dos puntos y con diferentes cualidades:

- Al aumentar la temperatura del benzoato de colesterol en estado sólido, observó que la sustancia se convertía en un líquido nebuloso.
- Si continuaba con el proceso de incremento de la temperatura, el material se ponía más claro y se convertía en un líquido transparente.

En 1922, George Friedel propuso una clasificación de los cristales líquidos según las diferentes ordenaciones moleculares que pueden presentar. Entre 1922 y la segunda guerra mundial, Ossen y Zöcher sentaron las bases matemáticas para el estudio de su comportamiento físico. Estos trabajos condujeron a la primera patente de una válvula de luz que usaba cristal líquido, otorgada a la Marconi Wireless Telegraph Company en 1936 [1]. No obstante, en esta fecha aún no se conocían materiales que tuviesen la fase de cristal líquido a temperatura ambiente (de hecho, la patente de Marconi describía un calentador para mantener el material en un rango de temperatura alto). Ya en la década de los 60 la tecnología de los Liquid crystal display (LCD) recibió un impulso decisivo gracias a los trabajos de George Heilmeyer y su equipo en los laboratorios de la RCA (*Radio Corporation of America*)[2]. El equipo de Heilmeyer descubrió que la mezcla de diferentes materiales que poseen la fase de cristal líquido produce soluciones que pueden mantenerse estables en dicha fase dentro de un amplio rango de temperatura, incluyendo la temperatura ambiente.

Los cristales líquidos presentan una amplia gama de fenómenos ópticos: esparcimiento de luz, transmisión, polarización, birrefringencia, retardos de fase. Estas propiedades ópticas de los cristales líquidos están en función del voltaje o de la temperatura. Debido al gran potencial de características únicas que los distinguen, juegan un papel importante en la industria

optoelectrónica y podemos encontrarlos en diversos aparatos electrónicos como: relojes, calculadoras, computadoras, televisores, osciloscopios, juguetes, etc.

Debido al bajo consumo de energía, los cristales líquidos son una parte clave de la reducción tecnológica e interaccionan con los nuevos dispositivos de vanguardia. En la actualidad la mayoría de los cristales líquidos interaccionan con la luz visible, debido a su facilidad de orientar las moléculas que los componen y cambiar tanto la intensidad como la fase de la luz.

Durante el año de 1895 emergió un nuevo concepto de dispositivos basados en cristales líquidos denominados como **polymer dispersed liquid crystal (PDLC)**. En este tipo de dispositivos, el cristal líquido se encuentra atrapado en pequeñas gotas de un polímero (micro gotas). Los nuevos dispositivos que se generaron a consecuencia de este descubrimiento, dieron lugar a diversas aplicaciones en tecnología optoelectrónica obteniendo de ellos interruptores electrónicos de luz a muy bajo costo. Una característica importante de los dispositivos PDLC, es la dispersión de la luz que en ellos se origina. En la fabricación de estos dispositivos no es indispensable la utilización de los polarizadores para poder observar sus efectos cuando se le aplica voltaje. Como ocurre con las pantallas de cristal líquido.

En esta tesis se presenta la elaboración y caracterización de un dispositivo PDLC (polymer dispersed liquid crystal) que se basa en la mezcla de un cristal líquido y un polímero. Esta mezcla da como resultado un dispositivo muy interesante que se puede aplicar en diversos sistemas electrónicos y en el hogar. Algunas utilidades de estos dispositivos se presentan en: ventanas de encendido y apagado, switches de sistemas electrónicos, pupilas electro-ópticas, hologramas, moduladores de intensidad de luz, etc.

Además, al utilizar un polímero dopado mezclado con el cristal líquido, es posible grabar hologramas en estos dispositivos que se conocen como ***holographic polymer dispersed liquid crystal (HPDLC)***.

1.2. Efectos electroópticos

Existen algunas aplicaciones donde el control de la transmitancia (relación entre la cantidad de radiación que atraviesa un material y la que incide sobre él) o reflectancia (relación entre la luz que se refleja frente a la cantidad de luz incidente) tiene implicaciones no solo de tipo económico (ahorro energético) si no también afecta de forma irreparable a sistemas biológicos especialmente sensibles a la cantidad de luz recibida, sistemas láser para imagen médica, pinzas ópticas, etc. La forma de controlar este tipo de radiación está basada en la interacción radiación-materia asociado a los siguientes efectos: transmisión (**T**), reflexión (**R**), esparcimiento (**S**) (por sus siglas en inglés: *scattering*) y absorción (**A**). Considerando una señal luminosa de potencia normalizada, se puede establecer entre ellos la siguiente relación:

$$T + R + S + A = 1 \quad (1)$$

El efecto electroóptico que presentan algunos materiales consiste básicamente en que, mediante la aplicación de una señal eléctrica de excitación externa, se puede modificar alguno de los términos de la relación anterior, si bien la suma de todos ellos debe permanecer constante. En términos prácticos, esto quiere decir que la cantidad de radiación a través de este tipo de materiales puede ser controlable eléctricamente, lo que puede facilitar la incorporación de los mismos a sistemas de control inteligentes más sofisticados, pasando a ser un elemento íntegramente más de la infraestructura de algún otro dispositivo o instrumento.

1.3. Materiales cromogénicos

En este ámbito, los materiales que pueden controlar selectivamente el espectro de una radiación en función de un determinado estímulo se les denomina cromogénicos.

Los materiales cromogénicos pueden dividirse en 2 categorías fundamentales:

- Pasivos, como los fotocromicos o los termocromicos.
- Activos, como los electrocromicos, los cristales líquidos y los electroforéticos o de partículas suspendidas.

La diferencia fundamental entre ambas categorías es que los pasivos no involucran interfaces eléctricas mientras que los activos sí. Dicho de otro modo, los primeros no necesitan una señal eléctrica de excitación para variar su comportamiento espectral a diferencia de los segundos.

Los materiales fotocromáticos reaccionan fundamentalmente a la presencia de luz UV y se usan preferentemente tamaños pequeños y su mercado actual se encuentra fundamentalmente en las gafas de sol.

Los materiales termocromáticos reaccionan a la presencia de calor y habitualmente contienen colorantes, tintes o pigmentos. Presentan alguna aplicación en la arquitectura y transporte. Su volumen de ventas a nivel mundial es reducido en comparación con otras tecnologías de cromogénicos [3].

1.3.1. Cromogénicos activos eléctricamente

Este tipo de materiales, como se comentó previamente, necesitan la aplicación de un campo eléctrico para modificar su espectro de transmisión y, por tanto, variar la transmisión óptica de la luz incidente sobre ellos. Al necesitar una interfaz eléctrica, se pueden manejar de forma manual, automática y excepcionalmente, pueden llevar un control integrado en la propia ventana o panel.

En el caso de dispositivos de cristal líquido (CL) o más concretamente de cristal líquido disperso en polímeros (**PDLC**), el balance o intercambio de potencia se realiza fundamentalmente entre los coeficientes S (*scattering*) y T (transmisión) de forma que el resultado puede ser un estado opaco para S máximo y T mínimo o un estado transparente para T máximo y S mínimo, en función de la señal eléctrica externa aplicada al dispositivo.

1.4. Objetivo general

Medir la eficiencia de difracción de los dispositivos PDLC, ver su eficiencia con respecto al voltaje aplicado y, grabar hologramas de Fouier en tiempo real. Construir y caracterizar los dispositivos optoelectronicos PDLC y HPDLC.

1.4.1. Objetivos específicos

1. Construir y comprender el funcionamiento de un dispositivo PDLC.
2. Caracterizar el dispositivo PDLC construido midiendo su eficiencia de difracción, sacando su espectro de transmisión con voltaje y sin voltaje.

3. Dopar el polímero empleado en la construcción del PDLC y fabricar un dispositivo.
4. Caracterizar el dispositivo HPDLC y grabar hologramas de Fourier.

1.5. Estructura de la tesis

En el capítulo 2 de esta tesis se muestran las clases y grupos de los cristales líquidos y sus propiedades físicas y ópticas.

En el capítulo 3 se muestra la descripción física y química de los materiales a utilizar, como lo son el polímero Norland Optical Adhesive N°65 (NOA 65), el cristal violeta de genciana y las características físicas del cristal líquido nemático E7.

En el capítulo 4 se muestra la fabricación del PDLC, así como la caracterización del dispositivo, mostrando los resultados obtenidos. También se presenta la forma en que se construye un PDLC con polímero dopado con cristal violeta de genciana en el que se graban rejillas y hologramas de Fourier, además se presenta su caracterización.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de esta tesis.

Capítulo 2

2. Teoría de dispositivos de cristal líquido

2.1. Tipos de cristal líquido y su clasificación

Los cristales líquidos se encuentran entre las fases sólida y líquida. Es por ello, que se introduce el término mesofase (Fig. 2.1) para describir la ubicación de los cristales líquidos dentro de la fase sólida y líquida; algunos autores hacen referencia a este tipo de componentes como fase mesomórficas. El incremento de la temperatura es un factor importante en el comportamiento de los cristales líquidos, alterando las propiedades físicas de dichos materiales. Es por ello que los cambios de fase ocurren cuando se agrega o quita energía (en general, en forma de calor). Los cambios de fase son cambios físicos que se caracterizan por cambios en el orden molecular, las moléculas en la fase sólida tienen el mayor ordenamiento y en la fase gaseosa tienen el mayor desorden.

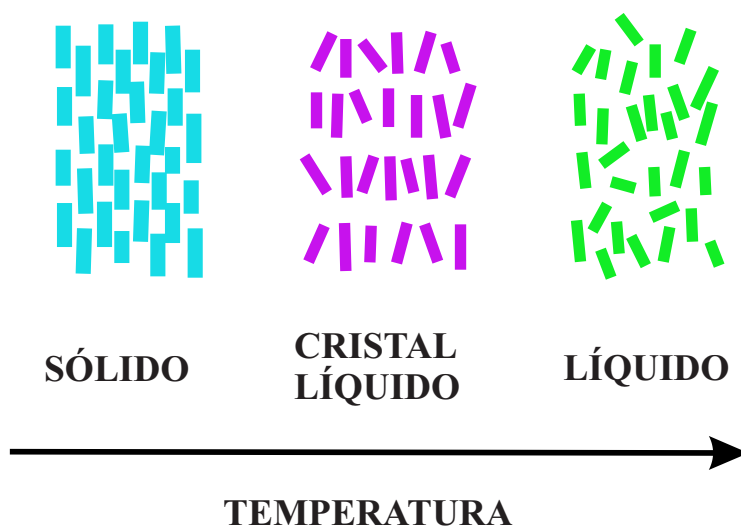


Fig. 2.1. Fase del CL, el cual se encuentra entre la fase del sólido y del líquido.

Los cristales líquidos están típicamente constituidos por moléculas en forma de elipsoide alargado, que poseen un único eje alrededor del cual existe

simetría circular. Estas moléculas se orientan según una dirección (algo propio de los sólidos) pero sus posiciones carecen de la ordenación propia de la materia cristalina (es decir, no forman una red cristalina tridimensional). Hasta ahora se han descubierto tres tipos de cristales líquidos: *termotrópicos*, *liotrópicos* y *poliméricos*.

2.2. Cristales líquidos termotrópicos

En este primer grupo se encuentran los cristales líquidos que dependen de sus características termodinámicas. Es decir, un cambio de sólido a cristal líquido en el punto de fusión y un cambio de cristal líquido a líquido isotrópico en el punto de transparencia. Estas características describen los llamados **cristales líquidos termotrópicos** y se clasifican en tres tipos de fases: *nemática* (palabra que deriva del griego y que significa "hilo"), *esmética* (también de origen griego, su significado es "jabón") y *colestérica* (de colesterol, alcohol esteroide, presente en las células animales y en los fluidos corporales).

2.2.1. Fase nemática

El cristal líquido que presenta la fase nemática presenta un alto grado en el orden de orientación de sus moléculas, (ver figura 2.2) pero no sucede igual con el orden de traslación y el orden de posición. El orden de traslación se puede entender como el movimiento de las moléculas con referencia a un eje. El orden de posición se entiende como la organización de estas moléculas con respecto a ciertas estructuras sólidas. Las moléculas apuntan en una sola dirección a la cual se le denomina eje director. Este tipo de cristal líquido entra en la clasificación de los materiales anisotrópicos y sus propiedades físicas varían de acuerdo a la alineación promedio con respecto al eje director. Si la alineación de estos materiales es arbitraria, presentará un cambio en sus propiedades anisotrópicas: los cambios que se producen afectan las constantes dieléctricas y los índices de refracción del cristal líquido.

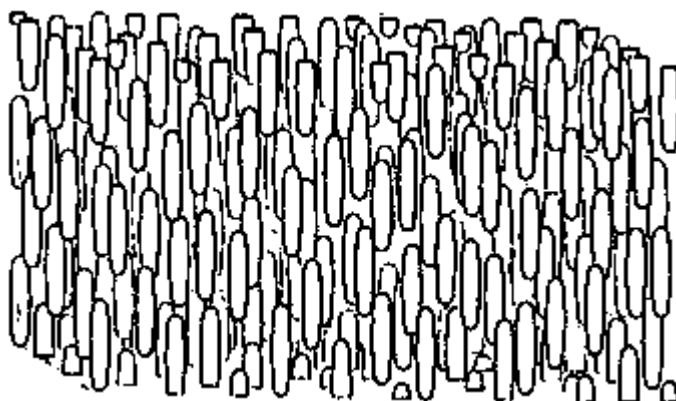


Fig. 2.2. Representación esquemática de la fase nemática.

Comúnmente, este tipo de materiales se utilizan en la fabricación de dispositivos de cristal líquido: conocidos como LCD's (Liquid Crystal Display).

Se puede manipular la orientación de las moléculas constituyentes del cristal líquido exponiendo estas moléculas a un campo eléctrico. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario contar con un par de electrodos transparentes que por lo general son fabricados de Óxido de Estaño Indio (Indium Tin Oxide, ITO) y realizar un emparedado con ellos (comúnmente se le conce como celda) donde se les depositará el cristal líquido. Posteriormente se conectarán los electrodos para que fluya la corriente a través de ambos electrodos y de esta forma se obtendrá el efecto deseado. De esta forma, la polarización de la luz seguirá la orientación que tengan estas moléculas y variará de acuerdo a los cambios que sufra esta celda. La respuesta que tienen la mayoría de estas celdas se da en tiempos de milisegundos.

2.2.2. Fase esmética

La fase esmética fue nombrada de esta manera debido a que es una sustancia resbaladiza como la superficie del jabón para baño. Las características que posee, es el orden de translación en el que se presenta, lo cual no sucede con la fase nemática y, las moléculas que la conforman tienen la capacidad de alinearse en sí mismas en capas o planos, los movimientos de estas moléculas se restringe en estos mismos planos. La fase de los cristales líquidos esméticos se subdividen en:

- Fase Esmética A. Al igual que la fase nemática, exhibe un rango bastante grande en el orden orientacional de sus moléculas. Su viscosidad

es bastante alta y no se aplica en dispositivos. Exhibe una especie de capa unidimensional; es decir, las moléculas se mantienen rígidas en cada una de sus capas, efectuando un solo movimiento en una dirección. El grosor de cada capa corresponde a la longitud de las moléculas. La fuerza de atracción que se da entre las moléculas es muy débil y las capas que forman las moléculas son fáciles de romper.

- Fase esméctica B. La diferencia con respecto a la fase esméctica A, radica únicamente en su forma: describe una estructura hexagonal.
- Fase esméctica C. Todas las moléculas que conforman esta fase se inclinan en un cierto grado con respecto a las capas. Las propiedades ópticas de este sistema tienen características biaxiales.
- Fase esméctica C* o bien ferroeléctricos. Estos materiales carecen de inversión de simetría: por lo cual se les denomina como cristales líquidos quirales pero presentan una importante característica debido a su simetría; esto es, si existe una polarización paralela a las capas que conforman la fase esméctica y es perpendicular a sus moléculas, empiezan a existir ciertos cambios con su estructura simétrica. La magnitud de la polarización se determina por sus consideraciones moleculares. Estos materiales se usan en la fabricación de disparadores de switches electroópticos donde el tiempo de repuesta tiene un rango de microsegundos.

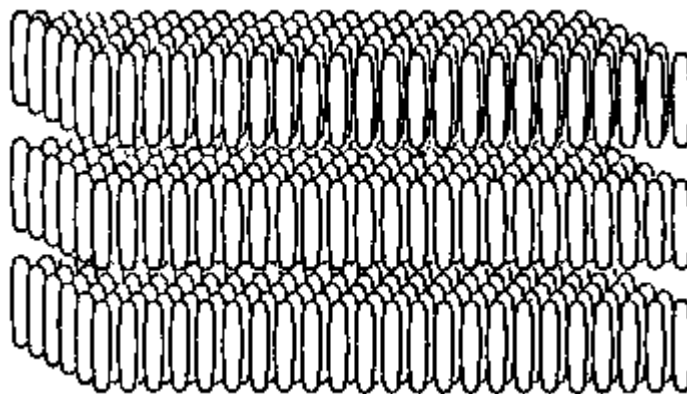


Fig. 2.3. Representación esquemática de la fase esméctica.

2.2.3. Fase colestérica

Los cristales líquidos que pertenecen al grupo de la fase colestérica generalmente son materiales que se encuentran en el colesterol. Las propiedades físicas que presenta el cristal líquido colestérico son similares a las propiedades físicas del cristal líquido nemático; sin embargo, la diferencia radica en el comportamiento de las moléculas que conforman los cristales líquidos colestéricos: formando una especie de hélice que se contrae conforme varía la temperatura del medio.

El comportamiento de contracción helicoidal que presentan las moléculas de los cristales líquidos colestéricos se presentan en la figura 2.4: el efecto se origina por fuerzas intermoleculares que van alineando cada molécula en función de un ángulo de giro muy pequeño. Conforme este ángulo de giro se incrementa, en función de la temperatura, el eje director ¹ rota formando una estructura helicoidal. Se ha definido a esta forma de rotación como *pitch*: que es la elongación que se toma para el eje director en el cual éste da una vuelta helicoidal completa.

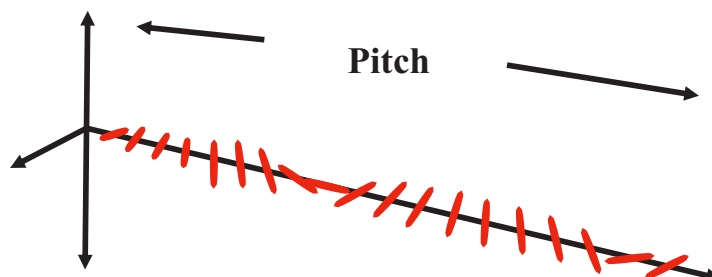


Fig. 2.4. Representación esquemática de la elongación que se produce en la fase colestérica de los cristales líquidos.

Generalmente el pitch es mucho más largo que la longitud de las moléculas. Otra característica importante de la fase colestérica es su dependencia de la temperatura afectando el pitch; en otras palabras, el pitch es directamente proporcional a la temperatura. La importancia de este hélice en la fase colestérica determina las propiedades ópticas de dicha fase: reflexión,

¹eje director es la dirección en que las moléculas están alineadas ver sección 2.5.

polarización circular de la luz y la potencia de rotación que es mil veces más grande que cualquier sustancia ópticamente activa.

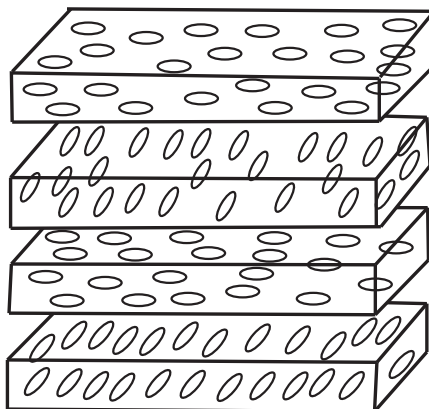


Fig. 2.5. Representación esquemática de la fase Colestérica.

2.3. Cristales líquidos liotrópicos

Los cristales líquidos liotrópicos, están constituidos por largas cadenas de hidrocarburos y se pueden encontrar en lugares como los residuos de jabón, parafinas, ceras, lecitinas, etc. Estos cristales líquidos dependen de la temperatura así como la cantidad de concentración de las sustancias que las constituyen. Una característica interesante de los cristales líquidos liotrópicos es la composición química de sus extremidades; es decir, una extremidad puede combinar ciertos grupos de moléculas mientras que la otra extremidad no lo hará con la misma combinación de moléculas o rechazará en su totalidad el grupo de moléculas. Un ejemplo de este efecto lo podemos encontrar en el agua, donde existen moléculas que pueden ser afines a ella mientras el otro extremo puede excluir totalmente las moléculas de agua. Este efecto resulta en estructuras de algunas formas, por ejemplo, formas esféricas y formas cilíndricas. Estas moléculas poseen los órdenes de orientación y de posición que presentan en su estructura molecular, es por ello que se consideran dentro de la fase del cristal líquido. Moléculas de este tipo se pueden representar por un círculo conectado con una cola.

2.4. Polímeros de cristal líquido

Los polímeros de cristal líquido, se clasifican por estructuras que tienen formas de spaghetti. En cada estructura molecular se presentan moléculas en formas de bastoncillos y cada uno de ellos se une a otro mediante una forma de resorte formando una cadena (ver figura 2.6). Los polímeros se subdividen en dos grupos dependiendo del modo en que forman sus cadenas. El primer grupo se compone por moléculas rígidas conectadas extremo a extremo por moléculas flexibles. El comportamiento de los polímeros de cristal líquido es similar a los nemáticos debido a que existe libertad de movimiento donde cada molécula rígida tiene la disponibilidad de orientarse en determinada dirección conforme se alinea el material. El segundo grupo de los polímeros de cristal líquido cuenta con cadenas de moléculas similares al del primer grupo, solo que estas cadenas de moléculas están unidas a largas estructuras flexibles del material.

Los polímeros de cristal líquido contienen la repetición de una unidad básica, la cual recibe el nombre de monómero. En la actualidad muchas sustancias macromoleculares se forman por reacciones de condensación entre moléculas pequeñas. Los productos de estas reacciones se les conoce como polímeros de crecimiento por pasos.

Por lo general, los cristales líquidos no están constituidos por polímeros, pero se encuentran ligados a ellos en otras formas, donde un par de ellos se describirán en esta tesis.

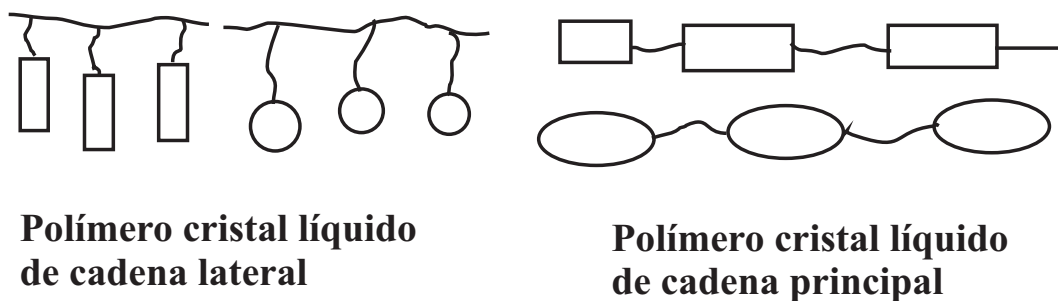


Fig. 2.6. Representación esquemática de polímeros de cristal líquido.

2.5. Eje director

La principal fuente de birrefringencia en polímeros y cristales líquidos es el orden en sus moléculas. Para los polímeros este puede ser introducido por la extensión o corte en la cadena y esto se debe principalmente al proceso de fabricación de las partes del polímero. Para cristales líquidos y polímeros de cristal líquido el orden es presentado debido a sus potenciales de interacción molecular. Existen tres diferentes tipos de orden: orden posicional, orden orientacional de enlace y orden orientacional. El orden posicional describe el grado de posición de un promedio de moléculas o un grupo de moléculas que muestran simetría translacional. El orden orientacional de enlace describe el orden de los centros de las moléculas unidas sin necesidad del espaciamiento regular a lo largo de esa línea. El orden orientacional mide la tendencia de alineación de las moléculas a lo largo del director en un rango básico. Para cuantificar la cantidad de órdenes presentados en un material, se define un parámetro de orden S . En la fase nemática las moléculas son principalmente como bastoncillos, con sus ejes longitudinales alineados aproximadamente paralelas entre sí. En cristales líquidos nemáticos homogéneos, el director es una constante. En cristales líquidos nemáticos inhomogéneos el director se convierte en una función de la posición. Se define un vector unitario que representa el eje largo de cada molécula. El director \mathbf{n} es un promedio estadístico de los vectores unitarios en un elemento diferencial de volumen alrededor de un punto. El parámetro de orden S se define como un promedio estadístico de las direcciones de los ejes largos de las moléculas individuales de la dirección del director como se muestra en la figura 2.7.

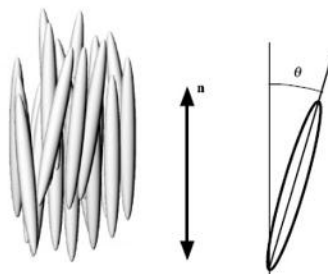


Fig. 2.7. Eje director de la orientación promedio de un diferencial de volumen que contiene varias moléculas.

En la fase nemática, el parámetro de orden se define como el promedio estadístico del ángulo entre cada molécula y el director,

$$S = \frac{1}{2}[3\overline{\cos^2\theta} - 1]. \quad (2)$$

donde θ es el ángulo entre las moléculas y el director. Los corchetes indican el promedio de todas las moléculas en la muestra. En un líquido isotrópico, el promedio del término $\overline{\cos^2\theta}$ es $\frac{1}{3}$, y por lo tanto el parámetro de orden es igual a cero. Para un cristal perfecto, el parámetro de orden se evalúa a uno. Los valores típicos para el parámetro de orden de un cristal líquido están entre 0.3 y 0.9. El orden imperfecto es un resultado del movimiento cinético molecular [4].

2.6. Birrefringencia en el cristal líquido

Los cristales anisotrópicos, pueden ser *uniaxiales* o *biaxiales*; es decir, pueden tener uno o dos ejes ópticos. En los cristales uniaxiales se observa el fenómeno de doble refracción o *birrefringencia*.

La birrefringencia se manifiesta cuando un rayo de luz que incide sobre la superficie de un cristal anisotrópico se desdobra en dos rayos refractados como se muestra en la figura 2.8.

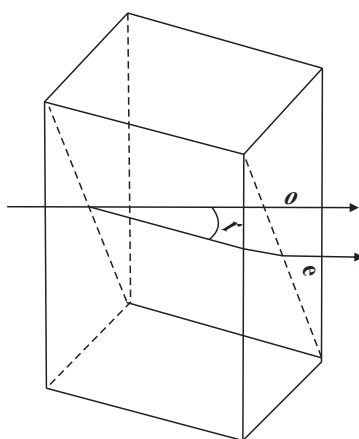


Fig. 2.8. Refracción de un rayo de luz cuando incide sobre un cristal anisotrópico.

El eje óptico de un cristal uniaxial, es la dirección a lo largo de la cual se propaga la luz sin experimentar el efecto de birrefringencia [5]. El eje óptico del cristal define la dirección privilegiada del cristal.

Un cristal uniaxial se clasifica en dos tipos: cristal uniaxial positivo y cristal uniaxial negativo. Los cristales líquidos uniaxiales poseen dos índices de refracción: índice de refracción ordinario n_o e índice de refracción extraordinario n_e .

La birrefringencia se denotará como:

$$\Delta n = n_e - n_o. \quad (3)$$

Si $n_e > n_o$ el cristal líquido se le nombrará cristal líquido uniaxial positivo, y si $n_e < n_o$ entonces se le nombrará cristal líquido uniaxial negativo. El índice de refracción se relaciona con la respuesta de la materia dentro de un campo eléctrico como:

$$\mathbf{P} = \mathbf{D} - \epsilon_0 \mathbf{E}. \quad (4)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del vacío. Si los campos eléctricos son muy pequeños, la polarización eléctrica \mathbf{P} será proporcional al campo eléctrico \mathbf{E} . En este caso, un medio anisotrópico como el cristal líquido uniaxial, podrá calcularse su polarización eléctrica \mathbf{P} por:

$$\mathbf{P}_i = \epsilon_0 \chi_{ij}^e E_j. \quad (5)$$

Donde $i, j = x, y, z$; χ_{ij}^e es un elemento del tensor de susceptibilidad eléctrica χ^e . La relación que existe entre la permitividad eléctrica con el tensor de susceptibilidad eléctrica estará dada por:

$$\epsilon = 1 + \chi^e. \quad (6)$$

La permitividad eléctrica dependerá de las frecuencias del campo eléctrico aplicado. En el caso de análisis para cristales líquidos, solo interesarán las frecuencias del rango visible o del rango óptico y se podrá determinar que el tensor de permitividad eléctrica dependerá del índice de refracción como:

$$\epsilon_i = n_i^2. \quad (7)$$

Donde $i = x, y, z$; n_i es el índice de refracción a lo largo de la dirección i . Las ecuaciones (5-7) dan la relación fenomenológica entre el índice de refracción y la polarización eléctrica para el cristal líquido. Considerando los índices de refracción de los cristales líquidos es posible determinar su elipsoide de índices de refracción [6].

2.7. Elipsoide de índices de refracción

Los medios anisotrópicos se caracterizan por presentar propiedades ópticas diferentes según la dirección considerada, típico de los materiales cristalinos. En general, el vector campo eléctrico \mathbf{E} y el vector desplazamiento \mathbf{D} tienen la relación $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$, donde ϵ es el tensor de permitividad dieléctrica. Es posible demostrar que este tensor es simétrico, por lo tanto, diagonaliza en una cierta base de vectores ortogonales. Para determinar el elipsoide de índices de refracción, la indicatriz óptica es un método que se utiliza en cristalografía, y muestra como el índice de refracción de un material transparente varía de acuerdo a la dirección de vibración de la onda luminosa. Para determinar la indicatriz óptica, se considera un número infinito de vectores que están localizados en un punto en común dentro del cristal, y radian superficialmente en todas las direcciones, se parte de la simetría de los tensores dieléctricos y se escogen los ejes principales, de esta forma todas las componentes que no están en la diagonal son cero y se tiene que:

$$[\epsilon_{ij}] = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Podemos definir el tensor de índices como:

$$\begin{pmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\epsilon_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\epsilon_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\epsilon_z} \end{pmatrix} \quad (9)$$

así como las velocidades principales:

$$v_x = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_x}}, v_y = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_y}}, v_z = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_z}} \quad (10)$$

La polarización inducida \mathbf{P} es la respuesta física del material en el campo eléctrico \mathbf{E} de la luz y no se encuentra en la misma dirección en medios anisotrópicos, ésta relación queda como,

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 x \mathbf{E}. \quad (11)$$

donde x es un tensor y ϵ_0 es la permitividad dieléctrica del vacío.

La relación entre el vector \mathbf{E} de campo eléctrico y el vector \mathbf{D} de flujo eléctrico en una onda electromagnética está dada por las expresiones siguientes:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P},$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \epsilon_0 x \mathbf{E}, \quad (12)$$

$$\mathbf{D} = (1 + x) \epsilon_0 \mathbf{E},$$

$$D_j = \epsilon_{ii} E_j.$$

donde $\epsilon_{ii} = (1 + x) \epsilon_0$ es el tensor de permitividad dieléctrica dada en la ecuación (8) y \mathbf{D} es el campo que podría existir si no hubiera un medio. La energía almacenada \mathbf{u} en el eje principal del cristal es:

$$\mathbf{u} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}. \quad (13)$$

sustituyendo las ecuaciones (8) y (12) en (13), se tiene:

$$\mathbf{u} = \frac{\epsilon_0}{2\epsilon_0} \left(\frac{D_j^2}{\epsilon_x} + \frac{D_j^2}{\epsilon_y} + \frac{D_j^2}{\epsilon_z} \right), \quad (14)$$

donde la relación $\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0}$ se escribe por conveniencia para obtener el elipse de los índices de refracción.

Sustituyendo para $j = x$ tenemos que:

$$\frac{D_x^2}{2\epsilon_0 u} = x^2, \quad (15)$$

para $j = y$,

$$\frac{D_y^2}{2\epsilon_0 u} = y^2, \quad (16)$$

para $j = z$,

$$\frac{D_z^2}{2\epsilon_0 u} = z^2, \quad (17)$$

sustituyendo y normalizando las ecuaciones (15),(16) y (17) en (14) se obtiene que:

$$\frac{x^2}{\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_0}} + \frac{y^2}{\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_0}} + \frac{z^2}{\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0}} = 1, \quad (18)$$

donde $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ se sustituyen por $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$.

De la relación $\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_0} = n_i^2$, la ecuación (18) queda como:

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1. \quad (19)$$

A la ecuación (19) se le llama elipse de índices de refracción. Las longitudes respectivas a los ejes mayor y menor, paralelos a los ejes x, y, z son n_o^2 y n_e^2 . Cada vector se dibuja en una longitud proporcional al índice refractivo del cristal, manteniendo las vibraciones de luz paralelas a los vectores dibujados. En un cristal líquido nemático, la dirección de vibración de la luz varía de acuerdo al índice de refracción el cual depende de la forma que adopte la indicatriz óptica. Para el caso de un cristal anisotrópico uniaxial, la indicatriz óptica forma un elipsoide, que depende de los índices de refracción ordinario y extraordinario. En la figura 2.8 se muestra la indicatriz óptica que se forma en cualquier cristal que tenga el fenómeno de birrefringencia a lo largo de su eje óptico.

La indicatriz óptica del cristal líquido nemático se encuentra dentro de una estructura trigonal donde el índice de refracción extraordinario (n_e) es paralelo al eje óptico (eje z). Por otro lado, a 90° del eje óptico se encuentran las direcciones del índice ordinario (n_o) como se muestra en la figura 2.9.

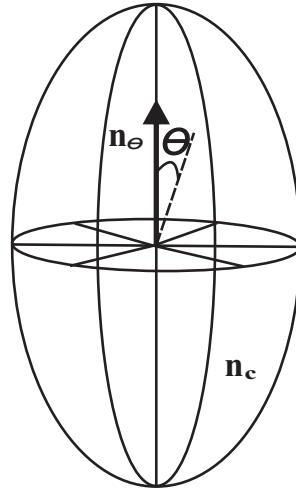


Fig. 2.9. Elipsoide de índices de refracción para un cristal uniaxial.

La indicatriz óptica nos permite comprender los procesos de modulación en intensidad y fase de la luz cuando esta atraviesa medios con algunos materiales birrefringentes y que reaccionan a la aplicación de un voltaje. Algunos cristales líquidos reaccionan al estímulo de un voltaje, haciendo que sus moléculas se orienten con el flujo del campo eléctrico. Los cristales líquidos nemáticos termotrópicos rotatorios reaccionan satisfactoriamente con estas características y es por ello que participan en el funcionamiento de la mayoría de dispositivos optoelectrónicos. El cristal líquido nemático rotatorio más común y que se encuentra en la mayoría de dispositivos optoelectrónicos es el cristal líquido conocido comercialmente como E7. En el siguiente capítulo se presentan algunas de sus características.

Capítulo 3

3. Materiales, descripción física y química de los materiales a emplear

3.1. Norland optical adhesive N°65 (NOA 65)

El NOA 65 es un material polimérico que tiene un buen comportamiento para el grabado de información como hologramas. Es distribuido por Norland Products Incorporated Company. Se utiliza como pegamento en los laboratorios de óptica para las lentes en monturas de metal, plástico o en vidrio.

El Norland Optical Adhesive N° 65 es un fotopolímero líquido y transparente compuesto por un monómero de acrilato con mercapto-éster, que es curado cuando es expuesto a la luz ultravioleta. Los polímeros que tienen base de acrilato y poliacrilato muestran buena respuesta para aplicaciones holográficas. Los acrilatos son familias de polímeros, los cuales son un tipo de polímeros de vinil compuestos de monómeros de acrilato. Los monómeros de acrilato son ésteres los cuales contienen grupos vinil, es decir, dos átomos de carbono unidos por un doble enlace y otro por un carbonil carbono (ver figura 3.1 a). Algunos acrilatos tienen un grupo metil extra unido a un carbono α y estos son llamados metilmetacrilatos. Con los monómeros de acrilato y el radical mercapto-éster es posible la construcción de las estructuras moleculares del adhesivo NOA 65. (Ver figura 3.1b)

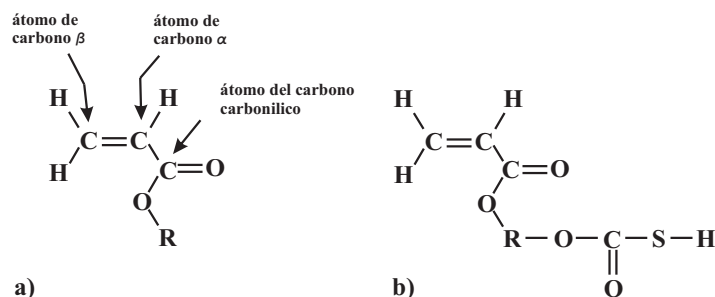


Fig. 3.1. Estructura del NOA 65. a) Monómero de acrilato. b) Estructura básica del adhesivo con mercapto-éster con monómero de acrilato.

El NOA 65 es curado con luz ultravioleta con un máximo de absorción en el rango de 350-380 nm. La energía requerida recomendada para el curado total es 4.5 joules/cm^2 con una longitud de onda larga UV. El polímero tiene una mínima inhibición al oxígeno. Para remover el adhesivo cuando no está totalmente curado se puede utilizar acetona y cloruro de metileno cuando éste totalmente curado.

En la siguiente tabla se muestran algunas de las propiedades del Norland Optical Adhesive 65:

Tabla 3.1. Propiedades típicas del NOA 65

Sólidos	100 %
Viscosidad a 25°C	1200 cps
Índice de refracción	1.524
Elongación	80 %
Fuerza de tensión (psi)	1500
Dureza	50
Rango de temperatura	-15 a 60°C

El tiempo de vida del NOA 65 es de 6 meses a una temperatura de 5-22°C. En la figura 3.2 se muestra el espectro de transmisión del Norland Optical Adhesive 65 para la región UV-VIS del espectro electromagnético.

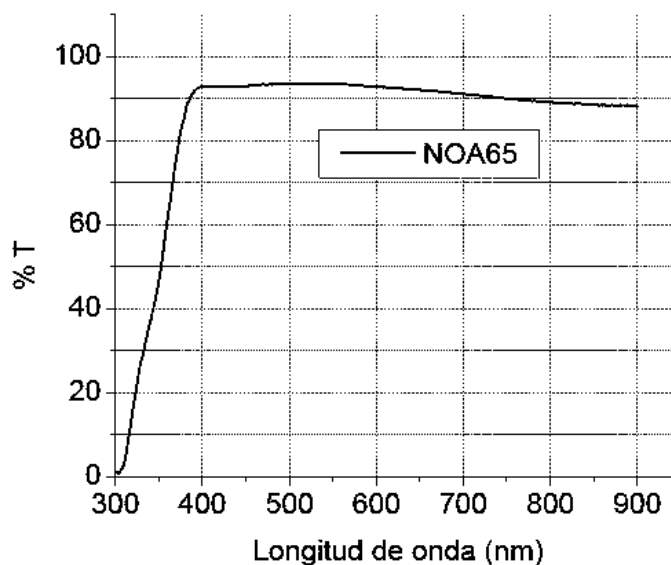


Fig. 3.2. Espectro de transmisión del NOA 65.

Una importante característica de este fotopolímero es que no necesita de un proceso convencional de revelado, este paso se sustituye por un proceso de curado del polímero. Estas propiedades son de suma importancia porque ellas abren la posibilidad de controlar y modular la fase del material con solo controlar el proceso de curado.

3.2. Cristal violeta de genciana

El cristal violeta de genciana (VGC) es un polvo de color verde oscuro, esta sustancia es soluble en agua, cloroformo, alcohol isopropílico y no es soluble en éter y alcohol etílico. Es usado como antiséptico para desinfectar heridas en el cuerpo humano y como indicador de pH para algunas sustancias. Su composición química es $C_{25}H_{30}ClN_3$ y su peso molecular es 407.98 gr/mol, en la figura 3.3 se muestra el diagrama y en la figura 3.4 su espectro de absorción.

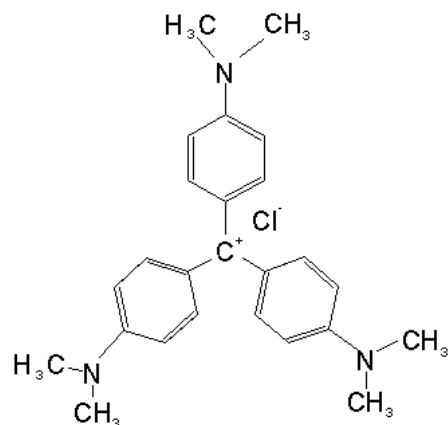


Fig. 3.3. Diagrama de la composición molecular del cristal violeta de genciana.

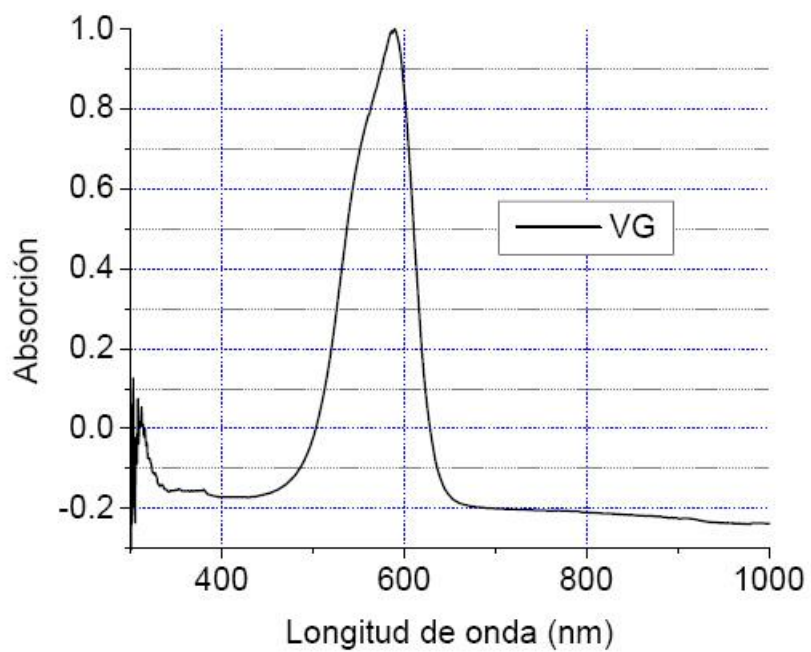


Fig. 3.4. Espectro de absorción del violeta de genciana.

3.3. Características físicas de los cristales líquidos nemáticos

La mayoría de los cristales líquidos se comportan como los cristales sólidos anisotrópicos. De ello, el análisis físico de los cristales sólidos puede aplicarse al de los cristales líquidos. Por ejemplo, el cristal líquido nemático E7 no tiene las mismas propiedades ópticas en cualquier posición de su estructura constitutiva, por lo que este material es un cristal anisotrópico. Su permitividad relativa y su índice de refracción dependen de las direcciones asociadas a las orientaciones de las moléculas del cristal líquido.

El cristal líquido que se utilizó se adquirió de la compañía Merck Company la cual reporta las siguientes características

Tabla 3.2. Propiedades típicas del cristal líquido nemático E7.

Temperatura de operación T (°C)	20
$\lambda(nm)$	577
Índice de refracción extraordinario n_e	1.75
Índice de refracción ordinario n_o	1.5231
Permitividad eléctrica ϵ_{\parallel}	19.6
Permitividad eléctrica ϵ_{\perp}	5.1
Constante elástica de separación $k_1(10^{-12}N)$	12
Constante elástica de torción (twisted) $k_2(10^{-12}N)$	9
Constante elástica de inclinación $k_3(10^{-12}N)$	19.5
rango de temperatura de operación (°C)	-10 \rightarrow 80

Ciertas características físicas que poseen las moléculas que constituyen los cristales líquidos y, en especial las orgánicas, son las que reaccionan a una energía externa tales como un voltaje, un cambio de temperatura, etc. En el caso de un voltaje aplicado a un cristal líquido sucederán los siguientes efectos: a) la muestra no reaccionará a ningún efecto ocasionado por el voltaje pero obedece a cambios de temperatura y b) la muestra reacciona al voltaje aplicado; lo cual se debe al tamaño de las moléculas que componen la muestra ya que son lo suficientemente grandes para actuar como un dipolo eléctrico, (figura 3.5). De aquí, que el tamaño y la forma de las moléculas

es fundamental para el funcionamiento de los dispositivos hechos con cristal líquido. Las moléculas que poseen la forma de spaghetti no responderán a ninguna estimulación externa y, de hecho, las moléculas que tienen la forma de bastoncillos o semejantes a un lápiz reaccionarán satisfactoriamente.

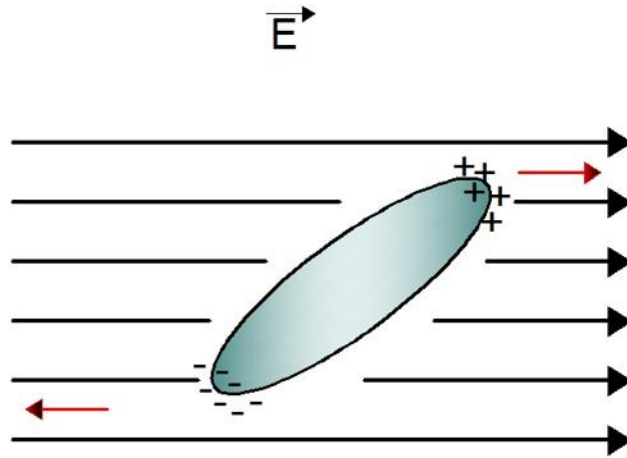


Fig. 3.5. Molécula de cristal líquido bajo la acción de un campo eléctrico.

Capítulo 4

4. Construcción y caracterización del dispositivo

4.1. Dispersión de la luz en un PDLC

Los dispositivos PDLC contienen una infinidad de gotitas en su superficie, y cada una de ellas contiene una pequeña porción de cristal líquido. Las gotitas que se encuentran cerca de la superficie harán que la luz se disperse. En la formación de las gotitas, que alcanzan dimensiones del orden de $0.4 \mu\text{m}$ de diámetro a $2 \mu\text{m}$ de diámetro, se crea un sistema ordenado entre ellas, la cual recibe el nombre de matriz del polímero y se representa por el índice de refracción n_s que corresponde al índice de refracción del polímero. De esta manera, el dispositivo PDLC tiene tres índices de refracción, n_s asociado al polímero y los índices n_e y n_o debidos al cristal líquido. El n_e determina el eje óptico en el PDLC, y junto con el n_o alteran el recorrido de la luz a través del dispositivo. Este hecho se muestra en la figura 4.1a. Al aplicar voltaje externo el cristal líquido que se encuentra encapsulado en el polímero, se orientará con el campo eléctrico \mathbf{E} provocando que las direcciones de los índices n_o y n_e se orienten, y la luz pueda pasar sin ser esparcida como se muestra en la figura 4.1b.

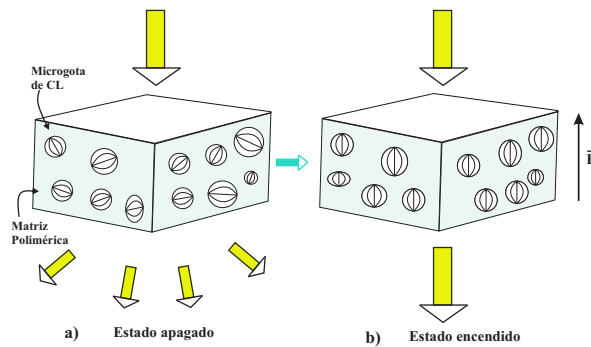


Fig. 4.1. Funcionamiento de un PDLC, a) Sin voltaje ($\mathbf{E} = 0$) la luz es esparcida, b) Con un voltaje ($\mathbf{E} \neq 0$) el cristal líquido se orienta.

4.2. Fabricación de un PDLC

Algunos materiales plásticos contienen pequeñas regiones o poros donde puede depositarse un cristal líquido. El cristal líquido que se deposita en estos polímeros reacciona con la aplicación de un voltaje: en la mayoría de los casos se deposita un cristal líquido nemático. Una vez que se realiza el proceso de depósito (que se mencionara a continuación), se procede inmediatamente a sellar el poro del polímero: en la mayoría de los casos, el proceso se lleva a cabo por la polimerización del polímero. Para la preparación del PDLC se utilizó cristal líquido nemático E7 el cual se mezcló con el polímero NOA 65 con la proporción 2:1, es decir, dos de cristal líquido nemático E7 y uno de NOA 65, los cuales se depositaron en una caja de petri previamente limpiada con acetona para tenerla lo más limpia posible tratando de que nuestra mezcla no tuviera impurezas.

Una vez que se tienen los dos componentes, es decir, el cristal líquido y el polímero (NOA 65) se mezclan durante 1 minuto y medio con un agitador magnético, en dicho tiempo los componentes se mezclaron perfectamente.

Una vez mezclados son depositados sobre dos placas de vidrio, previamente cubiertas por un conductor transparente ITO, con separadores los cuales pueden ser mylar o celofán, con espesores entre 10 y 50 micras² medidos con un micrómetro digital.

Para la colocación de los separadores, primero se estira el mylar y posteriormente se coloca sobre la placa de vidrio, después es colocada la segunda placa de vidrio encima de la primera, cuidando de que no se mueva el separador ya que esto podría causar diferencia de espesores en el dispositivo. Una vez colocada la segunda placa de vidrio se colocan un par de pinzas para papel para mantener fijas las placas mientras se sellan con pegamento (epoxi es el recomendado).

Para el llenado se recurre a la técnica de gravedad que consiste en depositar la mezcla en el borde de la celda y dejarla en reposo sobre una superficie en posición vertical. Por acción de la gravedad, el material se va deslizando entre las placas de vidrio hasta que la celda se llena por completo. Una vez llena la celda se debe procurar no hacer presión sobre esta, ya que podría

²dichos espesores son recomendados para dispositivos de cristal líquido

alterar el espesor o formar burbujas de aire, los cuales afectan la eficiencia o el esparcimiento³.

Enseguida se caracteriza por espectroscopía UV-Vis. A continuación se muestra el espectro del PDLC sin polimerizar y polimerizado.

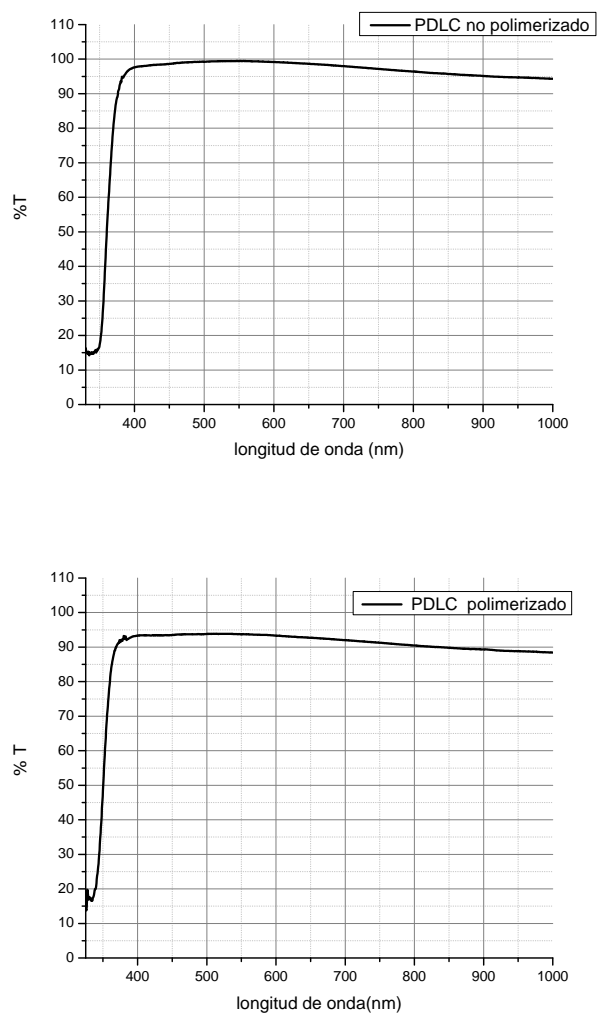


Fig. 4.2. Espectro de transmisión del PDLC, a) sin polimerizar y b) polimerizado.

³El esparcimiento de la luz es un efecto típico de los dispositivos PDLC que podría ser confundido por una burbuja de aire en la celda

Se observa que el PDLC no polimerizado tiene mayor transmitancia y esto se debe a que cuando se polimeriza el PDLC adquiere opacidad la cual en el rango de los 400-700 nm hay absorción por dicha opacidad.

Enseguida se muestra un esquema de como funciona el PDLC y como se conecta al variac.

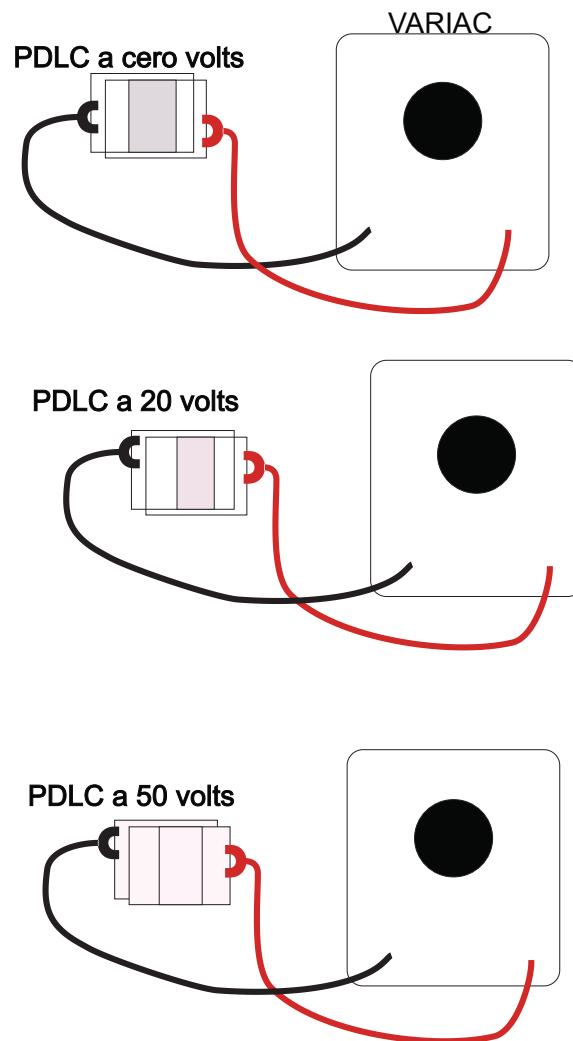
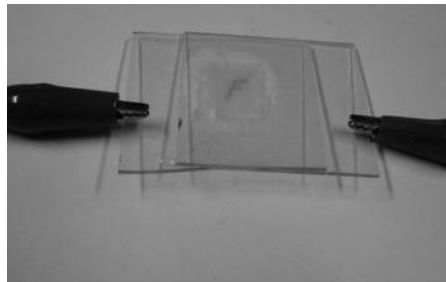
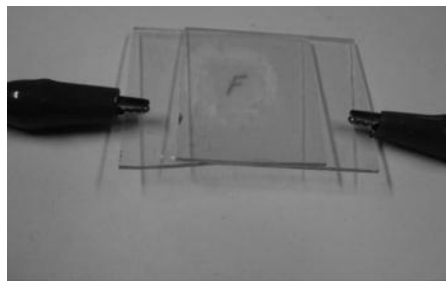


Fig. 4.3. Esquema del funcionamiento de un PDLC y como se conecta al variac.

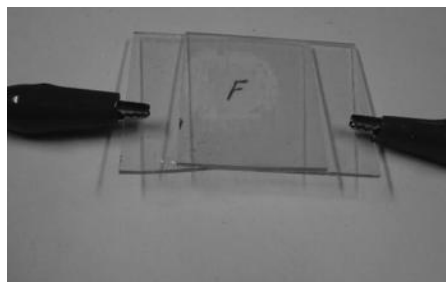
A continuación se muestra una fotografía del funcionamiento del PDLC.



a)



b)



c)

Fig. 4.4. Funcionamiento de un PDLC, a) Sin voltaje ($\mathbf{E} = 0$), la luz es dispersada y no se observa la imagen que se encuentra atrás del dispositivo, b) Con un voltaje ($\mathbf{E} = 20V$) el CL se empieza a orientar y se comienza a observar la letra, c) Con un voltaje ($\mathbf{E} = 50V$) el cristal líquido se orienta y se observa la letra claramente.

En el inciso a) no se le aplica voltaje al dispositivo, la luz es dispersada y no se observa claramente la imagen que se encuentra atrás de este. En el inciso b) se le aplican 20 volts entonces las moléculas comienzan a orientarse y se empieza a observar la imagen. En el inciso c) se le aplican 50 volts entonces el cristal líquido se orienta con el campo eléctrico y se observa claramente la imagen.

4.3. Fabricación de un HPDLC

Para preparar el HPDLC primero se mezcló el NOA 65 con el cristal violeta de genciana (VGC) a temperatura ambiente. Estos se mezclan con un agitador magnético y se deja reposar una hora. La proporción que se utilizó para mezclarse con el cristal líquido fue 0.15 % de VGC y 99.85 % de NOA 65.

Después que se tiene la mezcla del polímero (NOA 65-VGC), se procede a mezclar con cristal líquido usando la proporción 2:1. Se agita la mezcla de Cristal líquido y NOA 65-VGC durante un tiempo de 2 minutos y medio, tiempo en el cual los componentes se mezclan perfectamente.

El proceso de depósito es el mismo que para el PDLC sin dopar (explicado en la sección anterior).

4.4. Caracterización del dispositivo HPDLC

Una vez fabricado el dispositivo se les realizó su espectro de transmisión al PDLC dopado, polimerizado y sin polimerizar (fig. 4.5 y 4.6 respectivamente).

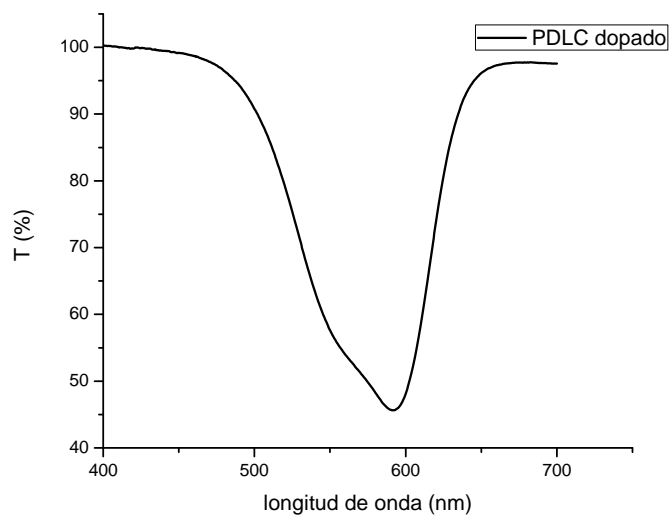


Fig. 4.5. Espectro de transmisión del PDLC dopado sin polimerizar.

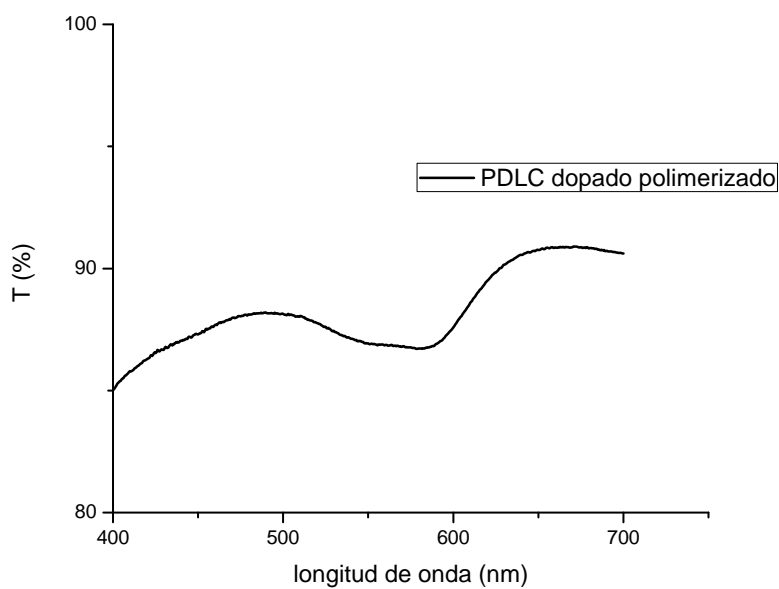


Fig. 4.6. Espectro de transmisión del PDLC dopado polimerizado.

Se obtuvo su espectro de transmitancia aplicando voltaje con una fuente de corriente alterna (*variac*⁴) con el dispositivo polimerizado y sin polimerizar. El cual se conecto al variac como se mostro en la figura 4.3. Los resultados se muestran en las figuras 4.7 y 4.8, con sus respectivos voltajes aplicados; en las cuales se observa que la transmitancia del material puede ser modificado si se le aplica un voltaje.

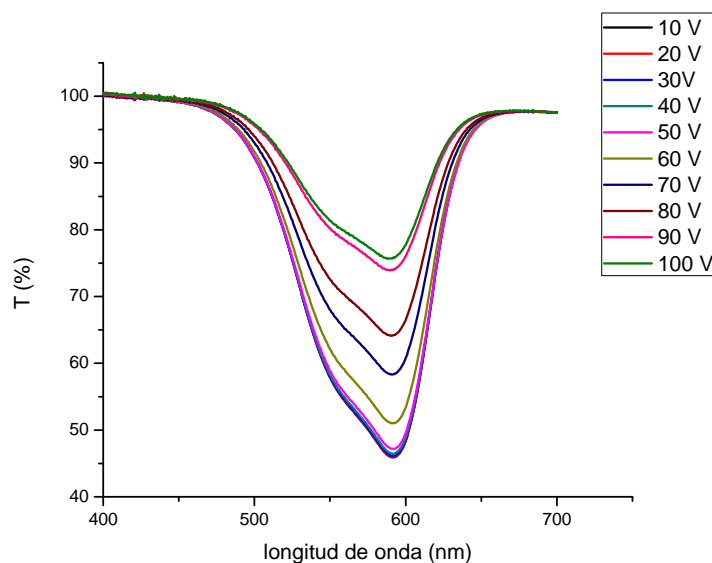


Fig. 4.7. Espectro de transmisión del PDLC dopado sin polimerizar a distintos voltajes.

⁴Variac es un auto transformador eléctrico variable con el cual se puede obtener una tensión de salida de corriente alterna entre 0 V hasta 130 V y la tensión de alimentación es de 120 V.

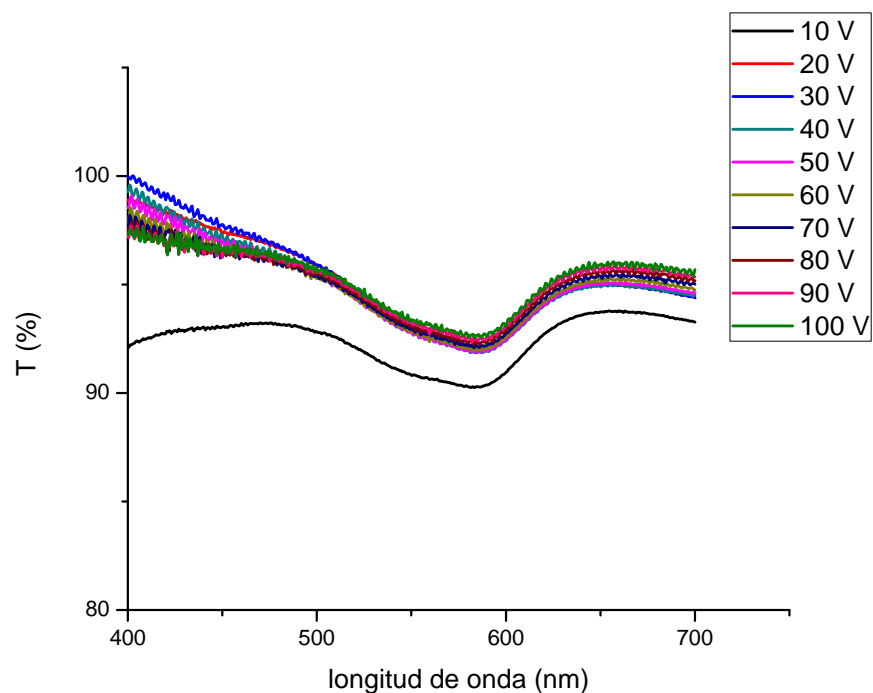


Fig. 4.8. Espectro de transmisión del PDLC dopado polimerizado a distintos voltajes.

Observamos en la figura 4.7 que podemos modificar la transmitancia del PDLC aplicando voltaje, vemos que a 10 volts tiene una transmitancia de aproximadamente 50 % mientras que para 100 volts la transmitancia aumenta aproximadamente a 75 % en la región de los 590 nm aproximadamente. Mientras que para el PDLC polimerizado (fig. 4.8) la transmitancia no se modifica mucho ya que a 10 volts tenemos una transmitancia de 90 % aproximadamente y a 100 volts una transmitancia de 93 % aproximadamente para la región de 590 nm.

4.4.1. Grabado de rejillas de difracción

Una vez obtenido su espectro de transmisión, se grabaron rejillas holográficas mediante un arreglo parecido al interferómetro de Young, haciendo un ángulo de 1.8° entre los haces provenientes de un láser de argón con línea de emisión en 514 nm y una potencia de 150 mW. En la figura 4.9 se muestra el esquema de este arreglo y en la figura 4.9 se muestra una fotografía del mismo.

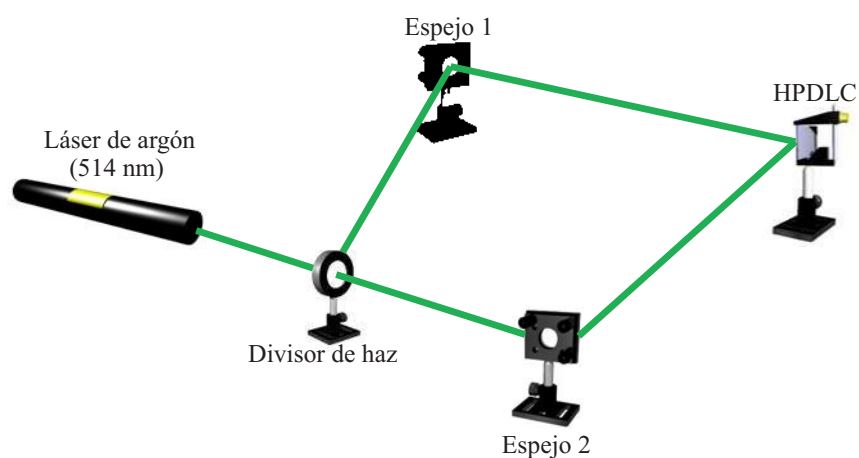


Fig. 4.9. Esquema del arreglo para el grabado de las rejillas.

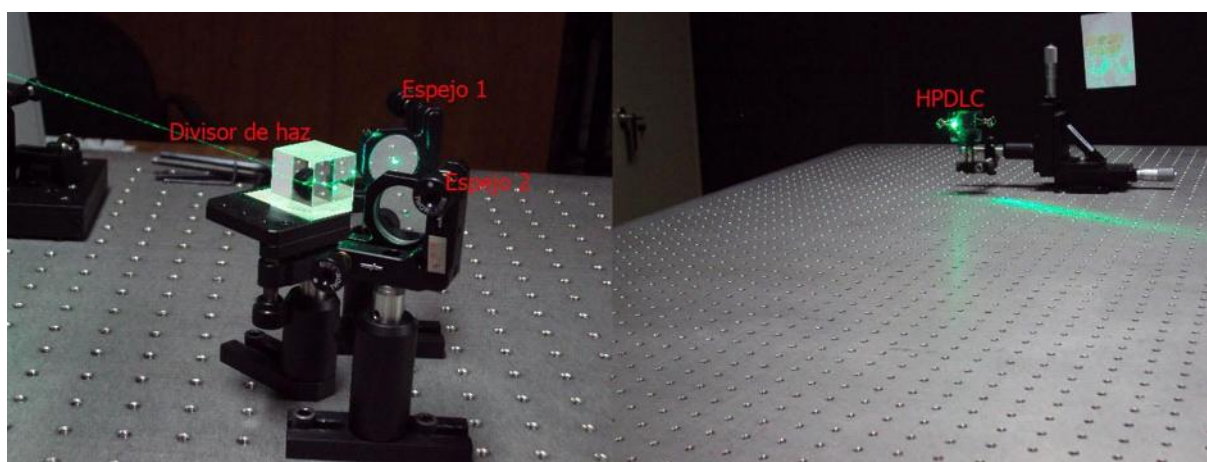


Fig. 4.10. Arreglo montado para el grabado de las rejillas.

En la figura 4.10 se muestra el arreglo utilizado para el grabado de las rejillas. Dicho arreglo consta de un láser de argón que emite un haz, el cual es desviado

por un espejo para hacerlo incidir en un divisor de haz el cual nos produce dos haces de luz idénticos, estos son desviados con dos espejos que están separados del divisor una distancia de 5.5 cm para superponerse a una distancia de 167.5 cm del divisor de haz donde es colocado el dispositivo HPDLC, formando un ángulo de interferencia de 3.6° .

4.4.2. Eficiencia de difracción

La eficiencia de difracción (η) es un parámetro muy importante que sirve para determinar la calidad de una rejilla y se define como la irradiancia de la luz monocromática difractada (I_t) entre la irradiancia incidente (I_0), esto multiplicado por 100 tal como lo indica la ecuación (20).

$$\eta(\%) = \frac{I_t}{I_0} \times 100 \quad (20)$$

En la figura 4.11 se muestra el arreglo para medir la eficiencia de difracción de una rejilla.

Cuando se incide un haz de luz sobre una rejilla, esta se desviará en direcciones discretas produciendo puntos luminosos ubicados en posiciones simétricas tal como se muestra en la figura 4.11. Estos puntos son simétricos respecto al orden cero ubicado en la misma posición del haz incidente. Por comodidad se nombra el orden de la izquierda (tomando como referencia la dirección del haz) como orden 1 y al de la derecha como orden -1 de difracción, de tal forma que al medir la intensidad de cualquiera de los dos órdenes multiplicado por 100 y dividirla entre la intensidad del haz incidente, se obtiene la eficiencia de difracción de dicho orden. En general, si la rejilla difracta en más órdenes, la eficiencia total será la suma de las intensidades de los órdenes difractados multiplicados por 100 entre la intensidad del haz incidente.

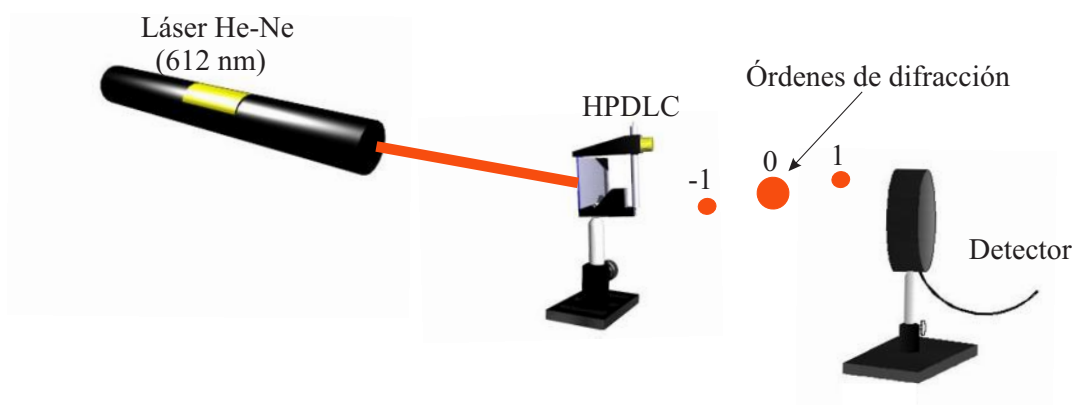


Fig. 4.11. Esquema del arreglo experimental empleado para medir la eficiencia de difracción de la rejilla.

A continuación se muestran las gráficas de la eficiencia de difracción vs energía de los dispositivos para distintos espesores, y así obtener el mejor espesor con su respectivo tiempo, en el cual alcanza su máxima eficiencia. Estas mediciones se realizaron midiendo el orden 1, con un medidor de potencia óptica de la marca Newport power meter model 2930C, el cual se conectó a la computadora mediante el programa Labview con el cual se hizo la adquisición de datos, obteniendo los siguientes resultados para los espesores de 10, 16 y 26 μm .

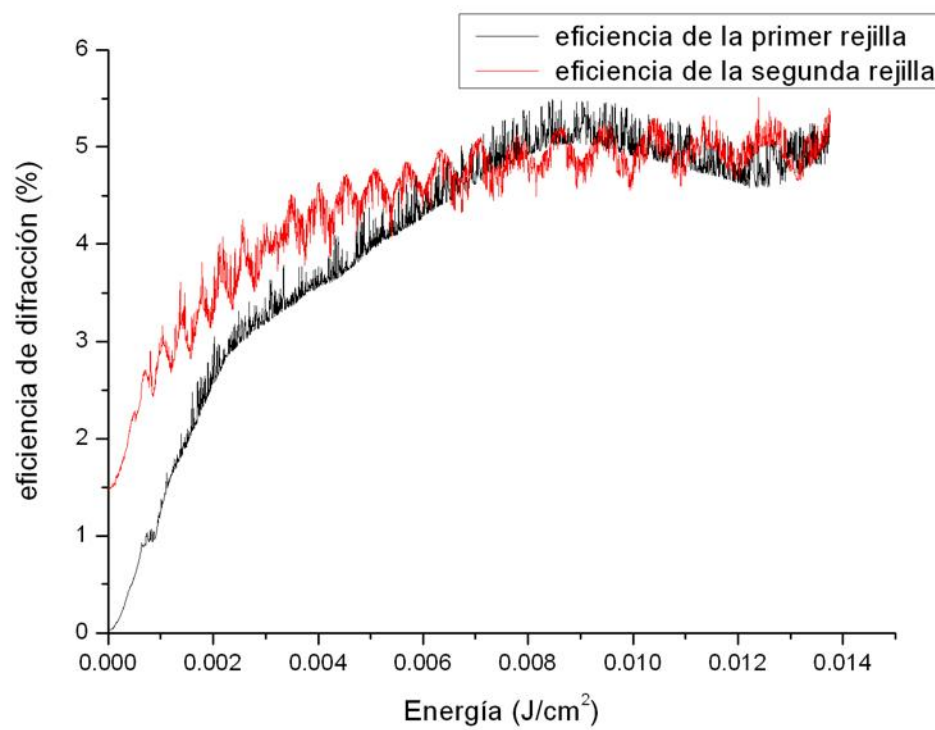


Fig. 4.12. Gráfica de eficiencia de difracción vs energía para un HPDLC de $10 \mu m$.

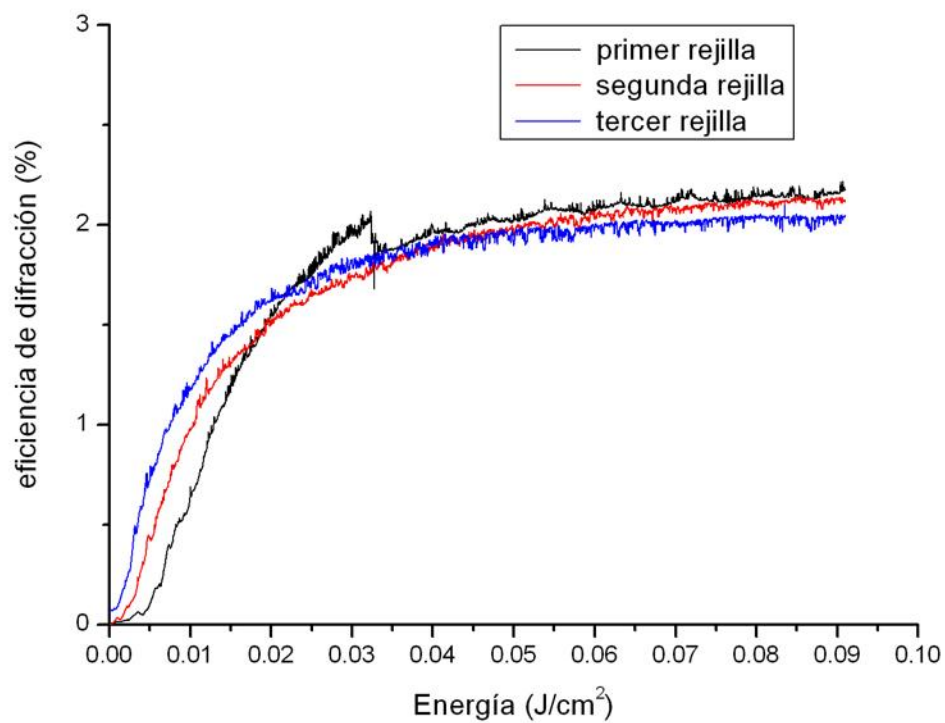


Fig. 4.13. Gráfica de eficiencia de difracción vs energía para un HPDLC de $16 \mu m$.

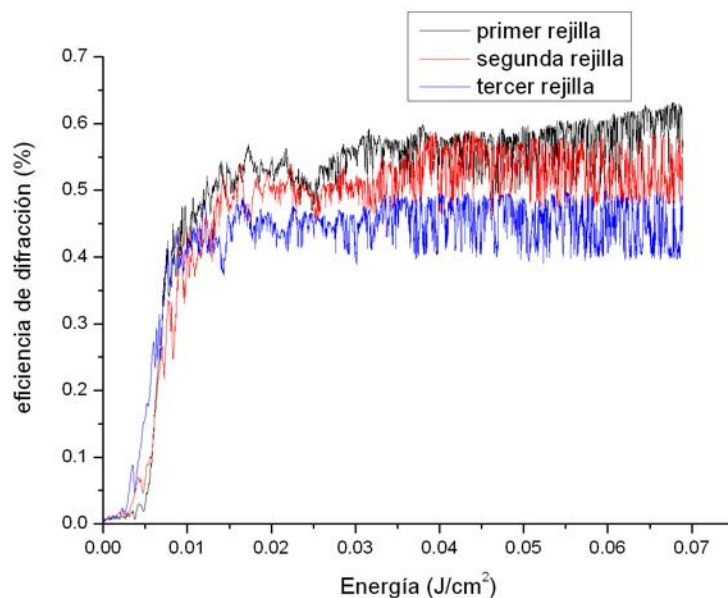


Fig. 4.14. Gráfica de eficiencia de difracción vs energía para un HPDLC de 26 μm .

4.5. Resultados

Las rejillas formadas en los dispositivos HPDLC difractan un haz de He-Ne con longitud de onda de $\lambda = 633 \text{ nm}$, con el que se mide la eficiencia. En la figura 4.12 se observa que el dispositivo alcanza una eficiencia de 5 % dicha eficiencia es para el espesor de 10 μm ; mientras que para los dispositivos de 16 μm y 26 μm la eficiencia de estos se reducen por debajo del 2.5 %. Las mediciones de la eficiencia de difracción de los dispositivos de 16 μm y 26 μm se hicieron con un láser de He-Ne de longitud de onda de $\lambda = 612 \text{ nm}$; y cuya eficiencia es muy baja, debido a que el PDLC muestra absorción en la línea espectral del naranja (612 nm). En las siguientes figuras se muestran las fotografías de la difracción del PDLC sin aplicar voltaje y con la aplicación de voltaje de corriente alterna suministrada por un *variatic*.

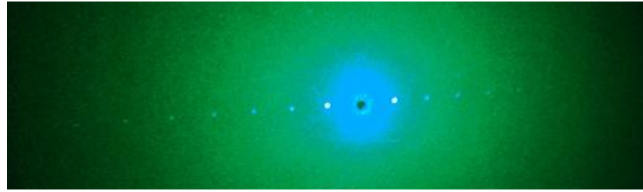


Fig. 4.15. Fotografía del HPDLC después de que se grabó la rejilla sin voltaje con el láser de argón (514 nm).



Fig. 4.16. Fotografía del HPDLC después de que se grabó la rejilla con voltaje con el láser de argón (514 nm).

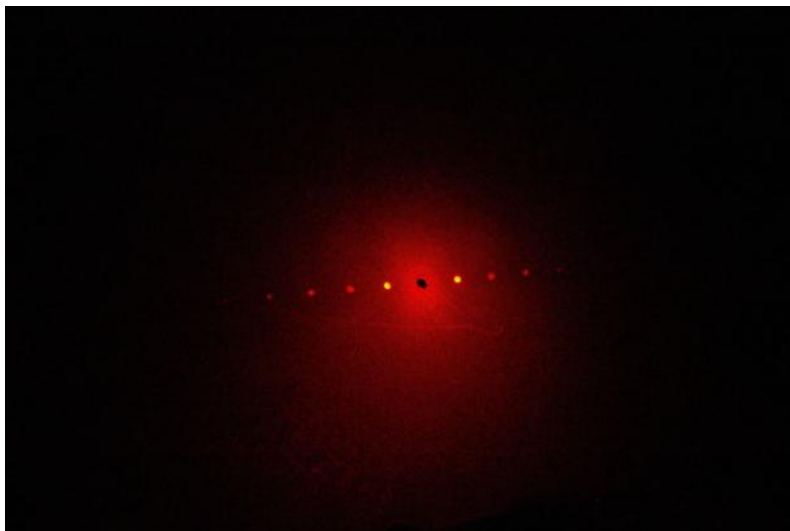


Fig. 4.17. Fotografía del HPDLC después de que se grabó la rejilla sin voltaje con el láser naranja (612 nm).

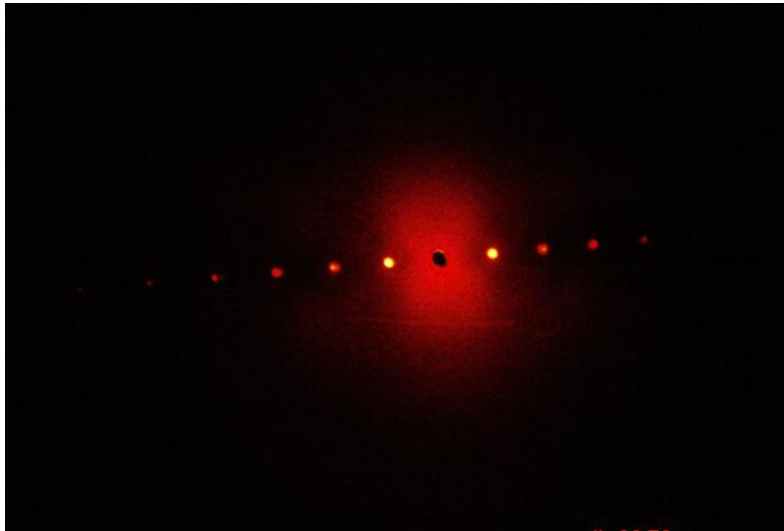


Fig. 4.18. Fotografía del HPDLC después de que se grabó la rejilla con voltaje con el láser naranja (612 nm).

Ahora se muestra la variación de la eficiencia de difracción conforme se aumenta el voltaje en el HPDLC de $15 \mu m$. El comportamiento de dichas curvas son similares solo que la primer rejilla su eficiencia de inicio es más baja que en las otras dos. La variación de las eficiencias se debe a la variación en intensidad del láser con que se midió.

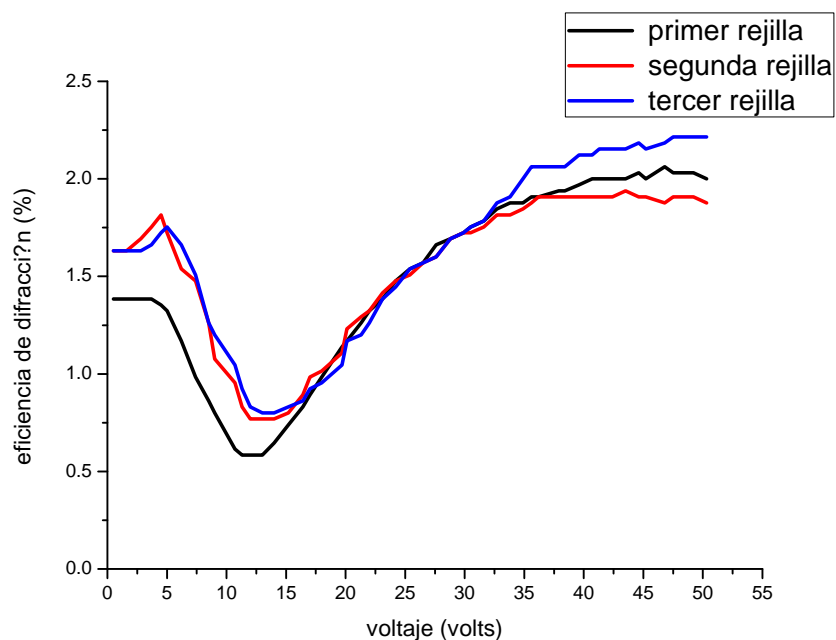


Fig. 4.19. Variación de la eficiencia de difracción con respecto al voltaje.

Con estos resultados se observa que la eficiencia máxima que se obtiene aplicando voltaje es igual a la eficiencia máxima al grabar la rejilla. Sin embargo, aparece un mínimo de eficiencia en el rango de 10 a 15 volts.

Visualmente cuando se incide el haz naranja sobre el HPDLC se forman 5 órdenes de difracción. Al aplicarle voltaje, el número de órdenes aumenta hasta 6 pero con una mejor visibilidad ya que el voltaje le quita dispersión, mientras que con el láser de argón cuando se incide el haz se observan solo 7 órdenes de difracción. Aplicándole voltaje llegamos hasta los 10 órdenes de difracción. La variación de los órdenes entre un láser y otro es debido a la cantidad de energía que emite cada uno, en este caso el de argón tiene mayor energía por lo tanto se observan más órdenes de difracción.

4.6. Hologramas de Fourier en HPDLC

4.6.1. Hologramas de Fourier

Este tipo de hologramas se realiza grabando la interferencia del haz de referencia con la transformada de Fourier de un objeto. Una de las principales características de este tipo de hologramas es que el área necesaria para grabarlo es pequeña comparada con otros tipos de hologramas. En la figura 4.20 se muestra el esquema para grabar hologramas de Fourier

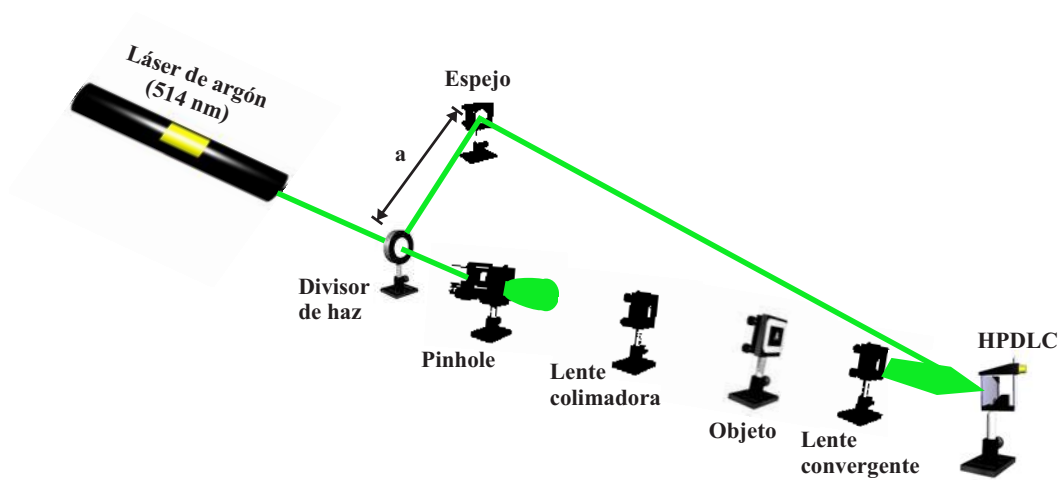


Fig. 4.20. Esquema del arreglo montado para el grabado de hologramas de Fourier.

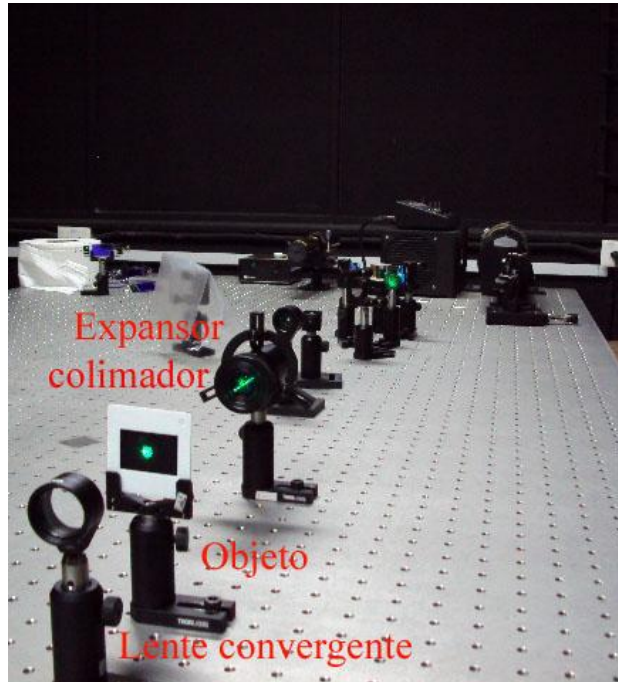


Fig. 4.21. Fotografía del arreglo utilizado para el grabado de hologramas de Fourier.

En la fotografía del arreglo se muestra un haz de luz proveniente de un láser de argón separado por un divisor de haz. Un haz, llamado de referencia, se dirige hacia el espejo y este es reflejado hacia el HPDLC; el segundo haz es parcialmente colimado por un expansor y este ilumina al objeto plano; la lente convergente obtiene la transformada de Fourier del haz proveniente del objeto y lo dirige hacia el HPDLC donde interfiere con el haz de referencia.

El haz de referencia es una onda plana que se define como

$$R = Ae^{i2\pi ua} \quad (21)$$

donde A es la amplitud de la onda, u es la frecuencia espacial dada por $u = x/\lambda f$ y a es la separación entre el divisor de haz y el espejo, ver figura 4.9.

Si una onda plana incide sobre una lente convergente, ésta genera la transformada de Fourier de la onda plana en su plano focal posterior y corresponde a un punto de luz que se puede representar por una función delta de Dirac,

$\delta(x, y)$. Similarmente, la transformada de Fourier de una fuente puntual (representada por una función delta de Dirac) es una onda plana. Por lo tanto, se puede reescribir la ecuación de la onda plana como

$$R = \frac{A}{\lambda f} \int \int \delta(x + a)\delta(y)e^{-i2\pi(ux+\nu y)}dxdy \quad (22)$$

El haz objeto de la transformada de Fourier del objeto, por lo tanto

$$O = \frac{1}{\lambda f} \int \int f(x, y)e^{-i2\pi(ux+\nu y)}dxdy \quad (23)$$

donde $f(x, y)$ es la función matemática del objeto conocida como función de transmitancia. De manera simplificada se tiene que

$$O = F\{f(x, y)\} \quad (24)$$

entonces la intensidad del patrón de interferencia del haz objeto y el haz de referencia registrada en la película holográfica, omitiendo constantes, esta dada por:

$$I = |R + O|^2 \quad (25)$$

o

$$I = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \quad (26)$$

sustituyendo las ecuaciones (20), (23) y (25) se obtiene

$$I = A^2 + |F\{f(x, y)\}|^2 + Ae^{-i2\pi ua}F\{f(x, y)\} + Ae^{-i2\pi ua}F^*\{f(x, y)\} \quad (27)$$

Ahora renombrando términos se tiene

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (28)$$

donde

$$I_1 = A^2, \quad I_2 = |F\{f(x, y)\}|^2, \quad I_3 = Ae^{-i2\pi ua}F\{f(x, y)\} \quad \text{y} \quad I_4 = Ae^{-i2\pi ua}F^*\{f(x, y)\}$$

Para la reconstrucción, el holograma se ilumina con un haz igual al de referencia, es decir

$$R \cdot I = R \cdot I_1 + R \cdot I_2 + R \cdot I_3 + R \cdot I_4 \quad (29)$$

Sustituyendo la ecuación (26) en la (28) se obtiene

$$R \cdot I = R \cdot A^2 + R \cdot |F\{f(x, y)\}|^2 + R \cdot A e^{-i2\pi ua} F\{f(x, y)\} + R \cdot A e^{-i2\pi ua} F^*\{f(x, y)\} \quad (30)$$

Desarrollando los términos y omitiendo los dos primeros debido a que generan el orden cero de la difracción, se tiene para el tercer término:

$$R \cdot I_3 = R \cdot A e^{-i2\pi ua} F\{f(x, y)\} \quad (31)$$

Por conveniencia se sustituye la ecuación de la onda plana representada en la ecuación (21) en la ecuación (30) y omitiendo constantes se obtiene

$$R \cdot I_3 = \int \int F\{f(x + a, y)\} e^{-i2\pi[u(x+a)+\nu y]} dx dy \quad (32)$$

La ecuación anterior se puede interpretar como la transformada de Fourier de la transformada de Fourier del objeto desplazado $f(x, y)$, y por la propiedad $F\{F[f(x, y)]\}$, se tiene

$$R \cdot I_3 = f(-x - a, -y) \quad (33)$$

Este término representa la imagen real del objeto que se encuentra en un punto a en el eje x positivo, siendo el orden 1 del patrón de difracción. Desarrollando el último término se tiene

$$R \cdot I_4 = R \cdot A e^{-i2\pi ua} F^*\{f(x, y)\} \quad (34)$$

Sustituyendo la ecuación (21) en la (34), utilizando la propiedad $F^*\{f(x, y)\} = -F\{f^*(x, y)\}$ y omitiendo constantes se obtiene

$$R \cdot I_4 = - \int \int \delta(x + a) \delta(y) e^{-i2\pi(ux+\nu y)} e^{i2\pi ua} F\{f^*(x, y)\} dx dy \quad (35)$$

Multiplicando las deltas por la transformada de Fourier y las exponenciales

$$R \cdot I_4 = - \int \int \{f^*(x + a, y)\} e^{-i2\pi[u(x-a)+\nu y]} dx dy \quad (36)$$

haciendo un cambio de variable donde $\eta = x + a$, $x = \eta - a$ y $dx = d\eta$ se obtiene

$$R \cdot I_4 = - \int \int \{f^*(\eta, y)\} e^{-i2\pi[u(\eta-2a)+\nu y]} d\eta dy \quad (37)$$

arreglando términos se tiene

$$R \cdot I_4 = -e^{i2\pi u 2a} \int \int \{f^*(\eta, y)\} e^{-i2\pi[u\eta + \nu y]} d\eta dy \quad (38)$$

por lo tanto

$$R \cdot I_4 = -e^{i2\pi u 2a} f^*(-\eta, -y) \quad (39)$$

Sustituyendo el valor de η en la ecuación anterior se obtiene

$$R \cdot I_4 = -e^{i2\pi u 2a} f^*(-x - a, y) \quad (40)$$

El término anterior representa la imagen conjugada del objeto en la posición $x = -a$ y es el orden -1 del patrón de difracción [14].

A continuación se muestra la fotografía del arreglo utilizado para grabar hologramas de Fourier. Y las imágenes de los hologramas que se lograron grabar en el dispositivo PDLC.



Fig. 4.22. Fotografía del holograma de Fourier de una flor y el objeto.

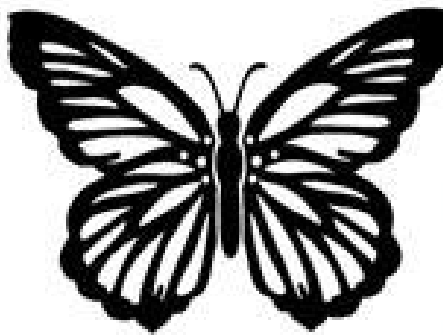


Fig. 4.23. Fotografía del holograma de una mariposa y el objeto.

Capítulo 5

5. Conclusiones

- Se contruyeron dispositivos PDLC de distintos espesores, como fueron 10, 16 y 26 μm .
- El de 10 μm fue el mejor espesor con el que se obtuvo una eficiencia de difracción del 5 %, con la cual se obtuvieron diez órdenes de difracción cuando se le aplicó voltaje. Por lo cual se concluye que a menor espesor mejor eficiencia de difracción se obtiene.
- Con estos dispositivos podemos observar mejor los órdenes de difracción ya que podemos quitar esparcimiento en el dispositivo con solo aplicarle voltaje de corriente alterna, cuyo esparcimiento es producido por la polimerización del polímero.
- Se pueden obtener hologramas más claros al aplicar voltaje.

Referencias

- [1] M. G. Friedel: *The Mesomorphic states of matter*. Annales de Physique, vol. 18, pp. 162-174, 1922.
- [2] B. Levin and N. Levin: *Improvements in or relating to Light Valves*. British Patent 441, 274, 1936.
- [3] Laura Aparicio Ixta: *Caracterización del Norland Optiocal Adhesive N° 65 y Violeta de Genciana como material fotosensible*. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo, 2007.
- [4] Toralf Scharf: *Polarized light in liquid crystal and polymers*. John Wiley & Sons, Inc. Wiley-Interscience. 2007
- [5] José Luis Jiménez Peñaloza: *Caracterización del modulador electroóptico APEtm microwave analog intensity con aplicación de transmisión de video compuesto*. Tesis de Maestría. Universidad de las Américas Puebla, 2005.
- [6] Mario Pérez Cortés: *Caracterización de materiales y dispositivos compuestos con un polímero dispersor y cristal líquido*. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, 2002. Tesis de Doctorado.
- [7] Lam-choon Khoo Wile: *Liquid crystals physical properties and nonlinear optical phenomena*. John Wiley & Sons, Inc. Wiley-Interscience. 1995.
- [8] W. H. De Jeu: *Physical properties of liquid crystalline materials*. Gordon and Breach, New York, 1981.
- [9] Eugene Hetch: *Óptica*. Addison Wesley, 1998.
- [10] Rodrigo Manzares Bolea: *Desarrollo de sistemas electroópticos para domótica y señalización vial*. Universidad Carlos III Valencia España, 2010. Tesis de Doctorado.
- [11] Vicente Durán Bosch: *Optimización de un modulador espacial de luz de cristal líquido mediante el modelo retardador-rotor*. Tesis de Doctorado. Universidad de Valencia, 2007.

- [12] Akifumi Ogiwara and Takuya Hirokari: *Formation of anisotropic diffraction gratings in a polymer-dispersed liquid crystal by polarization modulation using a spatial light modulator*. Applied Optics. Vol. 47, N° 16, 2008.
- [13] Hiroshi Ono, Nobuhiro Kawatsuki *Real-time holograms in liquid crystals on photoconductive polymer surfaces*. Optics Communications N°147. Elsevier Science B.V. 1998.
- [14] Howard M. Smith: *Principles of holography*. Second edition, John Wiley & Sons, Inc. 1975.