

Película de celofán como retardador de media longitud de onda de amplio espectro

Mario Pérez-Cortés¹, Mauricio Ortiz-Gutiérrez

Resumen

En este trabajo, se presenta el uso del celofán como un retardador de media longitud de onda en el rango espectral de $\lambda = 400$ a 700 nm. Se caracteriza este nuevo retardador usando luz proveniente de un láser y de una lámpara de luz blanca con un monocromador. Esta película se comporta como cualquier otro retardador de media longitud onda comercial pero además tiene las ventajas de tener un bajo costo y una fácil disponibilidad en el mercado.

Palabras clave: Retardadores, Polarización, Celofán.

Introducción

El celofán se fabrica a base de celulosa y su principal aplicación es hacer las películas para ²empaquetar productos perecederos y de diversa índole (Diccionario Reader's Digest, 1986; Enciclopedia Británica, 1980). Desde su invención en 1920, su transparencia llamó la atención y empezó una revolución en la envoltura de los materiales. Aunque es muy sensible al agua y a los cambios de humedad, el celofán es muy popular aunque ya existen otros materiales más manejables que éste. Existen en el mercado diferentes materiales parecidos al celofán, muchos de ellos fabricados de polivinilo que difícilmente se maltratan al usarlo, sin embargo la característica del primer celofán fabricado a base de celulosa es su fragilidad al manipularlo. En este trabajo se emplea el celofán fabricado a base de celulosa desde una perspectiva diferente, a saber, para su uso en los laboratorios de docencia e investigación en física y química donde se realizan experimentos de óptica, por lo tanto se estudian algunas de sus propiedades.

En experimentos tales como polarimetría, actividad óptica, interferencia, entre otros, es necesario modificar el estado de polarización de un haz de luz (Hecht et al., 1979; Driscoll et al., 1978; Collet, 1993). Existen placas retardadoras que permiten realizar estos fenómenos físicos en el laboratorio con excelentes resultados. Generalmente, el costo de estos dispositivos varía desde uno a varios cientos de dólares americanos dependiendo de la marca y calidad; además tienen un tamaño aproximado de 2.5 cm de diámetro (Griot, 1998). El interés por el uso del celofán es que su comportamiento es similar a estas placas retardadoras comerciales pero su costo es de apenas unos cuantos pesos y es fácil de adquirir.

Una placa retardadora es un dispositivo óptico que permite cambiar el estado de polarización (Hecht et al., 1979; Schurcliff et al., 1954; Klein et al., 1986) de la luz y normalmente están fabricadas con materiales como calcita, cuarzo o mica, aunque recientemente se ha reportado el uso de películas de poliéster como placa retardadora de cuarto de onda (Ortiz et al., 2000). En este trabajo se describe la técnica empleada para caracterizar películas de celofán y los resultados que muestran su eficiencia como Retardador de Media Longitud de Onda (RMLO) de amplio espectro, y se compara su comportamiento con placas retardadoras comerciales fabricadas de mica.

¹ Profesor de Carrera de Ingeniería Física UADY, e-mail: mariopc@fi.uady.mx

² Escuela de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo e-mail: mauricio@fisimat.umich.mx

Metodología

Las placas retardadoras son materiales cristalinos que de alguna forma introducen un cambio de fase, en una cantidad predeterminada, en una de las dos componentes coherentes que constituyen un haz de luz.

El cambio de fase se produce debido a la estructura cristalina del material. Existen 14 estructuras diferentes conocidas como redes de Bravais (Kitel, 1993), así por ejemplo, en las estructuras hexagonal, tetragonal y trigonal los átomos están dispuestos de tal manera que un haz de luz que se propaga en alguna dirección dentro del material, encontrará una estructura asimétrica. Tales cristales son anisótropos y birrefringentes, (también son denominados cristales uniaxiales) donde su eje óptico corresponde a una dirección alrededor de la cual los átomos están dispuestos simétricamente. La dirección del eje óptico también se denomina eje rápido y la dirección perpendicular, donde los átomos están en forma asimétrica, se denomina eje lento. De esta manera, un cristal que tenga alguna de estas estructuras tendrá dos índices de refracción, uno debido al eje rápido y otro debido al eje lento, llamados índice ordinario (n_o) e índice extraordinario (n_e) respectivamente.

Los cristales que tengan alguna de las estructuras ortorrómbicas, monoclinicas o triclinicas, tendrán dos ejes de simetría o ejes ópticos por lo que se llaman cristales biaxiales, y poseen tres índices de refracción diferentes, como por ejemplo la mica.

El celofán posee un eje óptico fácilmente identificable si se coloca entre dos polarizadores con sus ejes de transmisión perpendiculares entre sí (Shyu et al., 1993; Kushnir et al., 1997). El eje del celofán generalmente coincide con su largo y es visualmente identificable por medio de las estrias que muestra.

La placa retardadora más simple consiste en un cristal de calcita cortado de tal forma que en la superficie se incluye el eje óptico o eje de simetría del cristal (Hecht et al., 1979). Un haz de luz que se propaga dentro de estos dispositivos “ve” dos direcciones, por lo que se divide en dos componentes. Una de las componentes oscila en una dirección paralela al eje rápido, mientras la otra oscila en la dirección perpendicular o el eje lento. Los haces de luz son llamados ordinarios y extraordinarios (también llamados onda o y onda e), respectivamente. Conforme las ondas o y e se propagan dentro de la

placa retardadora se crea una diferencia de fase. Tal diferencia es causada por el retraso del haz que viaja en el eje lento en comparación a la del haz que viaja en dirección del eje rápido y es proporcional a la distancia que viaja dentro de la placa. Cuando ambos haces emergen del material se combinan para formar un haz cuyo estado de polarización es generalmente diferente a la que incidió en el retardador. La diferencia de fase entre las ondas o y e dependen del espesor del retardador empleado.

Existen placas retardadoras de un cuarto, de media y de onda completa. Una placa que introduce una diferencia de fase de múltiplos de $\pi/2$ radianes entre las ondas o y e de un haz que viaja dentro de ésta es llamada placa retardadora de cuarto de onda; las placas retardadoras de media onda introducen una diferencia de fase relativa de π radianes (o múltiplos de π) entre las ondas o y e ; y las placas retardadoras de onda completa incrementan la diferencia de fase en una cantidad equivalente a la longitud de onda de la luz empleada, es decir, aumentan en 2π radianes por lo que son de poco interés práctico.

En general, una placa retardadora que introduce un cambio de fase, $\Delta\Phi$, está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta\Phi = k\Lambda \quad , \quad (1)$$

donde k es conocido como número de onda y tiene un valor dado por $k = 2\pi/\lambda$, en la que λ es la longitud de onda; y Λ es la diferencia de camino óptico.

La diferencia de camino óptico, Λ , es la diferencia en distancia que recorre el haz que viaja en dirección del eje rápido respecto del que viaja por eje lento. Esta diferencia es provocada por las diferentes velocidades a las que el haz se propaga dentro del material debido a la birrefringencia.

Para un material birrefringente con índices de refracción n_o y n_e de espesor d , la diferencia de camino óptico es $\Lambda = (n_e - n_o)d$, por lo que la diferencia de fase en una placa retardadora está dada por la Ec. (2),

$$\Delta\Phi = \Phi_e - \Phi_o = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d. \quad (2)$$

Puede observarse que la diferencia de fase depende tanto de la longitud de onda como del espesor del material. Por ejemplo, una placa

retardadora de cuarzo ($n_o = 1.5443$ y $n_e = 1.5534$) con un espesor determinado no produce el mismo retraso en fase para un haz de luz roja ($\lambda = 633$ nm) que para uno verde ($\lambda = 532$ nm). Es por esto que existen en el mercado placas retardadoras para una longitud de onda específica, haciendo más caros estos dispositivos.

Particularmente, un **RMLO** se produce cuando $|\Delta\Phi| = \pm\pi, \pm3\pi, \dots \pm(2m+1)\pi$ esto es cuando

$$|n_e - n_o|d = (2m + 1)\frac{\lambda}{2},$$

donde $m = 0, 1, 2, \dots$

El efecto de introducir un cambio de fase en π radianes en uno de los haces que pasan a través de una placa retardadora es un cambio de la polarización lineal vertical a horizontal y viceversa. Además, también cambia el estado de un haz con polarización

elíptica izquierda a otro con polarización elíptica derecha y viceversa.

En la Fig. 1 se muestra un haz proveniente de una fuente de luz y un monocromador, cuyo estado de polarización es horizontal después de atravesar un polarizador lineal. Al incidir sobre la placa retardadora de media longitud de onda (película de celofán en la figura), cuyo eje rápido forma un ángulo de 45 grados respecto del eje x, su estado de polarización cambia a uno vertical, el cual es identificado con la ayuda de otro polarizador (también llamado analizador) y un detector. Cuando el eje de transmisión del analizador es vertical, paralelo al estado de polarización del haz incidente, se produce un máximo en intensidad que es registrado por el detector. Si el haz incidente no hubiera sufrido cambio alguno en su estado de polarización horizontal e incidiera sobre el analizador, sería absorbido completamente y el detector no registraría intensidad alguna.

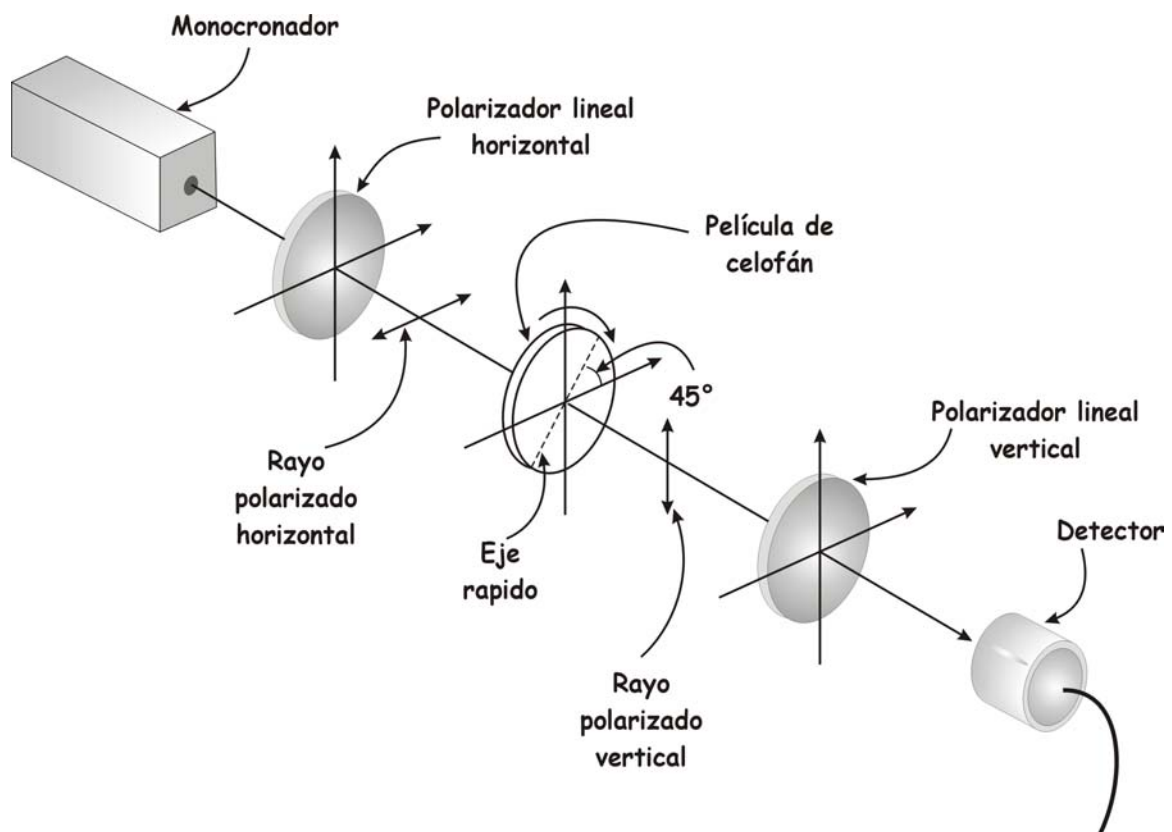


Figura 1. Esquema del arreglo experimental empleado para la caracterización de la película de celofán.

Esta figura muestra el cambio en el estado de la polarización de un haz horizontal a uno vertical producido por la película de celofán.

El cambio de la orientación de la luz polarizada de cualquier estado se puede representar matemáticamente con la ayuda del formalismo de Jones o de Mueller (Hecht et al., 1979; Collet, 1993; Griot, 1998). Por simplicidad solo empleamos el formalismo de Jones, donde las placas retardadoras pueden ser representadas por una matriz de 2x2. En general, las placas retardadoras con su eje rápido horizontal se expresan mediante la Ec. (3),

$$Mr(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(i\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

La matriz $Mr(\theta)$ representa cualquier retardador cuyo eje rápido forma un ángulo θ con el eje horizontal del sistema de referencia; mientras que δ corresponde a la fase que introduce el retardador entre la onda o y la e .

Un haz de luz se puede representar por un vector de Jones. En nuestro caso, el haz de luz polarizada vertical incidente puede representarse por la Ec. (5), y el polarizador con su eje de transmisión horizontal se representa por la Ec. (6).

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La luz es conducida a través del sistema representado en la Fig. 1 y la irradiancia (Hecht, 1979), $I(\theta, \delta)$, registrada en el detector es expresada por la Ec. (7).

$$I(\theta, \delta) = |PMr(\theta)E|^2 \quad (7)$$

y sustituyendo las Ecs. 4-6, la Ec. 7 conduce a:

$$I(\theta, \delta) = 4|\cos(\theta)\sin(\delta/2)\sin(\theta)|^2 \quad (8)$$

$$r(\delta) = \begin{pmatrix} \exp(i\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta/2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde δ representa el retraso en fase.

Para cualquier orientación del eje rápido de la placa retardadora, se emplean las matrices de rotación, por lo que exceptuando constantes y considerando las matrices normalizadas, obtenemos la Ec. (4):

Particularmente, cuando la placa retardadora introduce un retraso de la fase de $\delta = \pi$, obtenemos

$$I(\theta, \delta) = 4|\cos(\theta)\sin(\theta)|^2 \quad (9)$$

La gráfica de esta ecuación se muestra en la Fig. 2. En este gráfico pueden identificarse fácilmente los cuatro máximos localizados en los ángulos correspondientes para $\theta = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$.

Resultados

Se realizaron una serie de mediciones para caracterizar el celofán como **RMLO** usando el arreglo experimental mostrado en la Fig. 1. Como se muestra en la figura la placa retardadora se coloca entre dos polarizadores ortogonales. El **RMLO** fue girado mecánicamente y el haz que pasa por el arreglo experimental genera una señal que es detectada. En este arreglo, usamos una lámpara de luz blanca como una fuente (Ealing mod. 27-1031) y un monocromador (Oriol Multispec mod. 77400) como dispositivo para seleccionar las diferentes longitudes de onda comprendidas en la región de 400 nm a 700 nm.

En la Fig. 3 se muestra la curva obtenida cuando la longitud de onda utilizada es $\lambda = 532$ nm. También en la misma figura, se comparan los datos correspondientes a la película del celofán, un **RMLO** comercial fabricado con mica, modelo #25450, distribuido por **ORIEL**® y la curva teórica esperada. Puede observarse que ambos materiales

comparten una conducta similar y es muy próxima al valor teórico esperado. Es tal el parecido entre las

curvas que corrobora el comportamiento del celofán como un **RMLO** a tal longitud de onda.

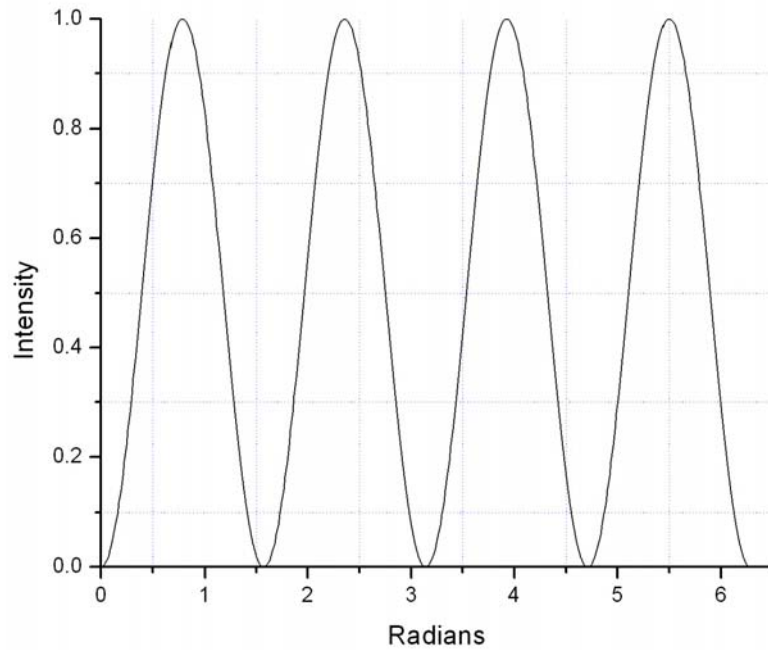


Figura 2. La Gráfica muestra una curva teórica donde se localizan cuatro máximos en los ángulos correspondientes para $\theta = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$.

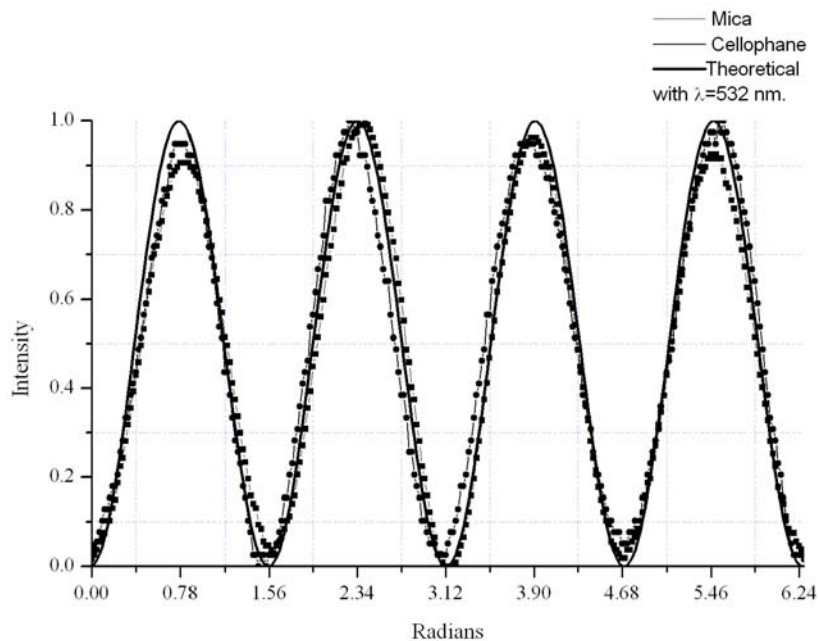


Figura 3. Curva obtenida cuando la longitud de onda es $\lambda = 532$ nm. Se comparan los datos correspondientes a la película del celofán con mica.

A

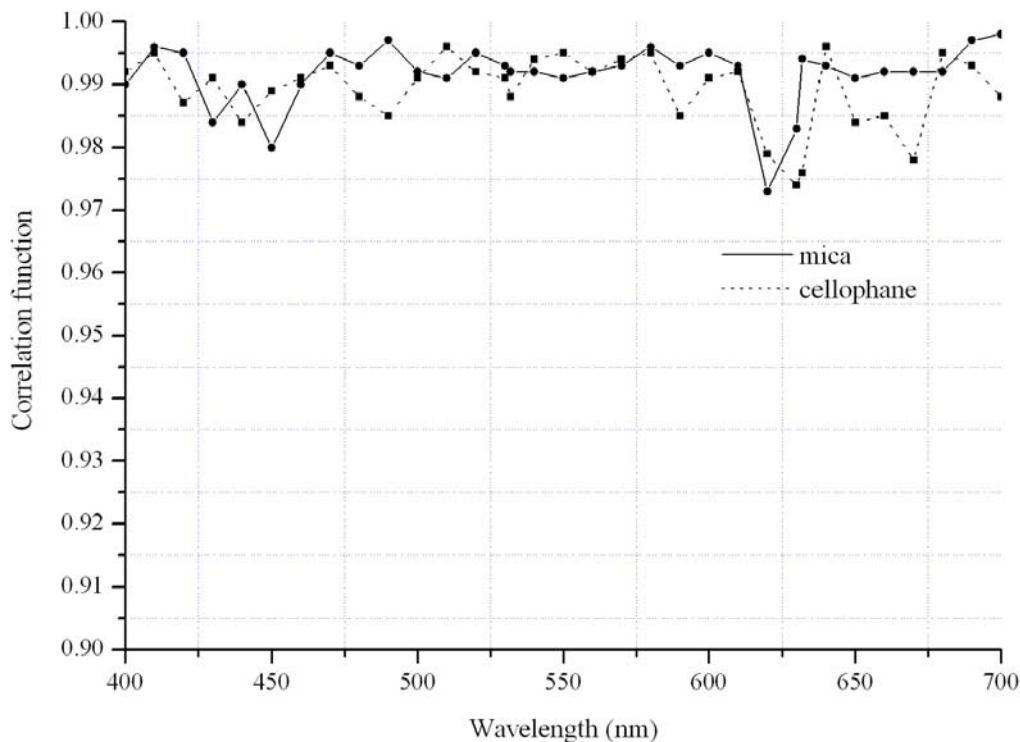


Figura 4. Longitud de onda diferentes para cada curva, con $\lambda = 400$ a 700 nm en intervalos de 10 nm.

En la Fig. 4, cada curva corresponde a una longitud de onda diferente, empezando con $\lambda = 400$ a 700 nm en intervalos de 10 nm. Además, el coeficiente de correlación de Pearson's (Ambromowitz et al., 1970) para las longitudes de onda $\lambda=488$, $\lambda=532$, $\lambda=633$, y $\lambda=780$ nm, también se muestra. Estas longitudes de onda corresponden a las líneas de emisión de láser comerciales. Estos resultados nos permiten concluir que el celofán se comporta como un buen **RMLO** de amplio espectro. Una de las propiedades más atractivas y útiles de la película de celofán es su transparencia su transmitancia de la luz y absorbancia del celofán en la región del espectro ultravioleta, visible e infrarrojo cercano, cuyas longitudes de onda varían de 300 a 900 nm. Estas curvas fueron obtenidas con un espectro-fotómetro Perkin Elmer.

También se caracterizó el celofán como **RMLO** utilizando una técnica adicional, la cual es mostrada en la Fig. 5. Se colocó el celofán sobre una placa de vidrio y se cortó en tiras de igual periodo retirando las franjas de celofán alternativamente simulando un enrejado, posteriormente, se coloca entre un juego de polarizadores lineales. Un primer polarizador se coloca con su eje de transmisión vertical para polarizar la luz que incide en el celofán,

posteriormente, se colocan dos polarizadores con sus ejes perpendiculares frente al enrejado del celofán como se muestra en la Fig. 5.

Cuando un haz de luz pasa a través del primer polarizador, este haz se polariza verticalmente e incide en el enrejado de celofán. La parte del haz que pasa por la placa de vidrio no se ve afectada o alterada en su estado de polarización, contrario a la parte que pasa a través del vidrio cubierto con celofán que cambia su estado de polarización de vertical a horizontal. Ambas partes del haz se propagan e inciden sobre el arreglo de polarizadores ortogonales que bloquean el paso de luz que tenga el estado de polarización perpendicular a su eje de transmisión. Así el polarizador superior que tiene su eje de transmisión vertical, solo permite el paso de luz que proviene de la placa de vidrio (que no este cubierto por celofán) y bloquea parte del haz que pasa por las regiones donde existe celofán, generando una zona oscura. El polarizador inferior realiza un proceso similar, bloquea el paso de luz que proviene de la placa de vidrio generando una zona oscura y permite el paso de luz que pasó a través del celofán generando una zona brillante.

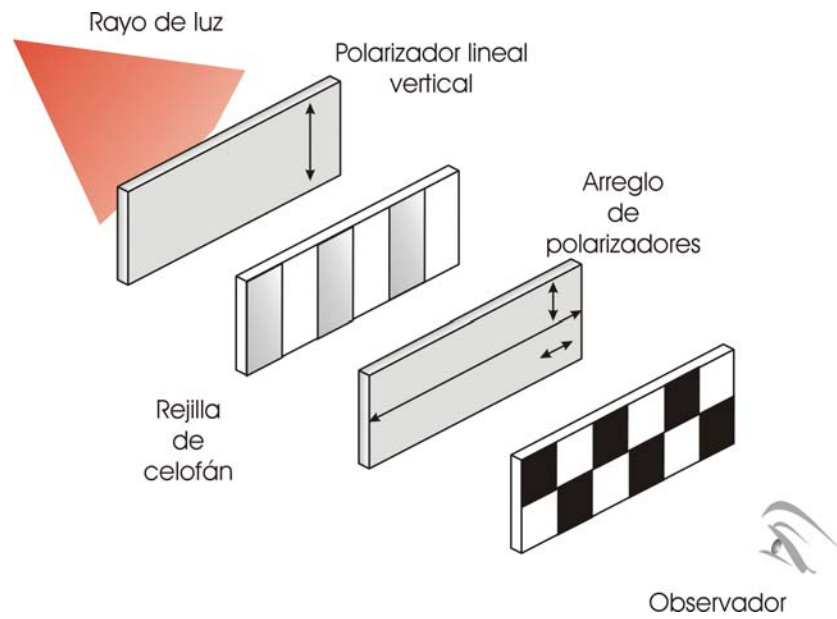


Figura 5. Representación esquemática que muestra los cambios en el estado de polarización del haz. La luz pasa a través de la rejilla del celofán y del arreglo de los polarizadores creando las áreas oscuras y blancas

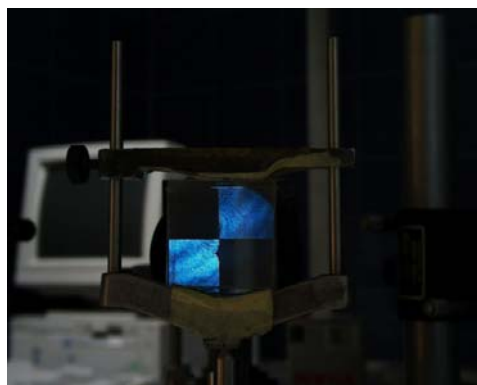
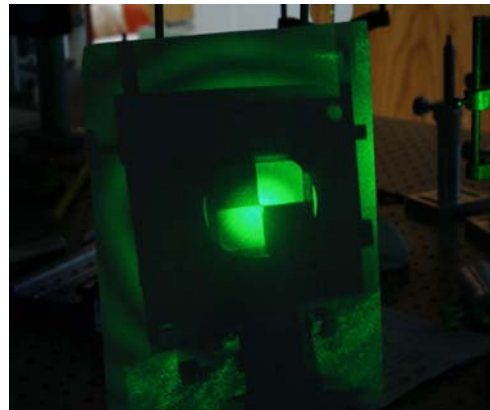
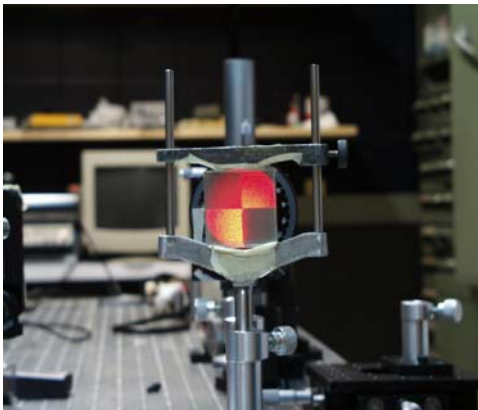


Figura 6. Experimento realizado con la implementación de celofán comercial. Se observa que la luz pasa a través de la rejilla del celofán y del arreglo de los polarizadores creando las áreas oscuras y blancas.

Como resultado, se crea un arreglo de zonas claras y oscuras parecido a un tablero de ajedrez (vea Fig. 5). Esta técnica se realizó empleando las longitudes de onda correspondientes al rojo, verde y azul ($\lambda = 632, 532$ y 488 nm) provenientes de diferentes láser. El resultado de esta técnica se muestra en la Fig. 6.

Conclusiones y Recomendaciones

Se ha encontrado que la película de celofán se comporta eficientemente como placa Retardadora de Media Longitud de Onda para el espectro visible comprendido desde $\lambda = 400$ hasta $\lambda = 780$ nm cuando la intensidad de la fuente es del orden de $10\mu\text{W}$ a 1 mW. Esta película introduce una diferencia de fase relativa de π radianes o 180° entre las ondas $\mathbf{o}$ y $\mathbf{e}$ de un haz de luz linealmente polarizado. Por consiguiente, pueden usarse estas películas como placas retardadoras con buen desempeño, y su característica es que son baratas y de fácil disponibilidad.

Referencias

- [1] G. Diccionario, Enciclopédico Ilustrado, Selecciones de Reader's Digest, México, second ed. Vol. 3 1986, pp. 719,721.
- [2] Encyclopaedia Británica, Encyclopaedia Británica, USA, 1980,15th ed., Macropaedia, vol. 2, pp.673, 674; Macropaedia, vol. 4, pp. 132.
- [3] E. Hecht, A. Zajac, Optics, fourth ed., Addison Wesley, USA, 1979, pp. 246-270.
- [4] W.G: Driscoll, W: Vaughan, Handbook of Optics Sponsored by the OSA, McGraw-Hill, New York, 1978, pp. 10-56-10-82.
- [5] Edward Collett, in: Polarized Light, Fundamentals and Application, Marcel Dekker, New York, 1993, pp. 33-217.
- [6] W. A. Shurcliff, S. S. Ballard, Polarized Light, Van Nostrand Momentum Book # 7, London, 1954, pp. 54-64.
- [7] M. V. Klein, T. E. Furtak, in: Optics, Wiley, New York, 1986, pp. 605-607
- [8] Melles Griot 1997-98 catalogue, pp. 167-171.
- [9] L.-H. Shyu, C.-L. Chen, D.-C. Su, Method for measuring the retardation of a wave plate, Appl. Opt. 32 (22) (1993) 4228-4230.
- [10] O. S. Kushnir, O. G. Vlokh, Null-polarimetric studies of waveplate parameters, Proc. SPIE 3094 (1997) 140-146.
- [11] M. Ortiz-Gutiérrez, A. Olivares-Pérez, J. L. Juárez-Pérez, V. Sánchez-Villicaña, 3MPP2500™ film as quarter wave retarder for light at $\lambda = 632.8$ nm, Opt. Mat. 14 (1) (2000) 41-48.
- [12] M. Ambromowitz, I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, ninth ed., New York, 1970, pp. 936-942.
- [13] Charles Kittel, Introduction to Solid State Physics, John Wiley and Sons Inc, 1976.