

# Retardadores de Fase



Erick Barrios Barocio; Arnaldo Hernández Cardona; Roxette Ramírez Arvidez.  
Laboratorio de Óptica, v.2018

Existen materiales los cuales actúan de forma distinta sobre distintas polarizaciones y longitudes de onda, estos materiales son denominados retardadores de fase y permiten transformar polarizaciones lineales en polarizaciones circulares o elípticas y viceversa. Actualmente estos materiales se utilizan mucho en sistemas de proyección en 3D y hasta en arte. En esta práctica se estudiará cómo es que estos materiales modifican la fase relativa entre dos polarizaciones ortogonales.

## Contenido

1	Diferencia de Fase.....	2
2	Retardador de Onda completa.....	3
3	Retardador de Media Onda.....	3
4	Lámina de Cuarto de Onda.....	4
5	Fotoelasticidad.....	5
6	Practica.....	5
6.1	OBJETIVO.....	5
6.2	MATERIAL.....	5
7	Referencias.....	5

## 1 DIFERENCIA DE FASE.

Los retardadores de fase operan modificando la fase relativa de las dos componentes principales de la polarización de una onda. Imaginemos que tenemos una onda cuyo campo eléctrico tiene dos componentes transversales y viaja en la dirección  $z$  se puede escribir como <sup>[1]</sup>:

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (1)$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{0y} \cos(kz - \omega t + \delta) \quad (2)$$

Donde  $\delta$  es la *diferencia de fase* y  $k$  es el vector de onda en el vacío. Los retardadores de fase modifican el valor de  $\delta$ , lo que se traduce en el cambio en la polarización de la onda. Al ser materiales birrefringentes, el retraso en fase solo se produce en una de las dos componentes del campo. Al salir del retardador, la fase relativa de las dos componentes es diferente a lo que era inicialmente.

En estos materiales los índices de refracción son diferentes para las dos componentes de polarización ortogonales que entran al material, a pesar de que los rayos siguen viajando de forma paralela. En dichos materiales, una onda con polarización ordinaria experimentará un índice de refracción que será  $n_o$  y la otra onda con polarización ortogonal (extraordinaria) experimentará un índice de refracción  $n_e$ ; después de atravesar una lámina de espesor  $d$ , la onda resultante volverá a ser la superposición de las ondas extraordinaria y ordinaria. La longitud de camino óptico recorrida por la onda ordinaria será  $\Lambda_o = dn_o$ , de forma similar la longitud de camino de la onda extraordinaria será  $\Lambda_e = dn_e$ . Por lo tanto, la diferencia de longitud de camino óptico entre las dos ondas será:

$$\Lambda = d(|n_o - n_e|) \quad (3)$$

Debido a que  $\delta = k \Lambda$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(|n_o - n_e|) \quad (4)$$

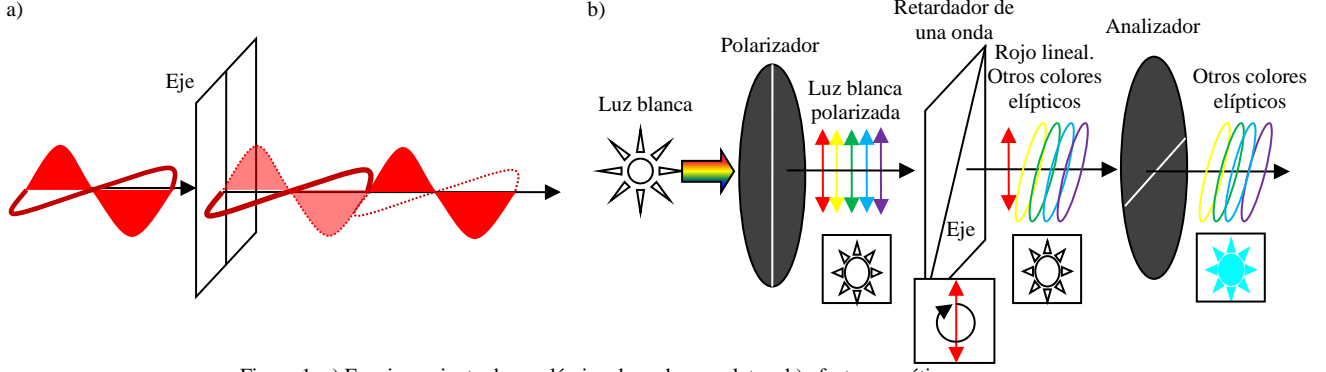


Figura 1. a) Funcionamiento de una lámina de onda completa y b) efecto cromático.

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío. Así, el estado de polarización de la luz emergente depende evidentemente de las amplitudes de las componentes ortogonales del campo y de  $\delta$ .

## 2 RETARDADOR DE ONDA COMPLETA.

Si  $\delta = 2\pi$ , el retraso relativo es una *longitud de onda completa*, por lo que las ondas extraordinaria y ordinaria estarán de nuevo en fase (o con la fase inicial con la que entraron al material) y no se detectará ningún efecto en la polarización de un haz. Cuando el retraso relativo  $\delta$ , denominado también retardancia, es de  $360^\circ$  el sistema se denomina lámina de onda completa, esto significa que en (4):  $d|n_o - n_e| = m\lambda$  donde  $m$  es un entero (Figura 1a).

Por lo general, la cantidad  $|n_o - n_e|$  cambia de una longitud de onda (o frecuencia) a otra, produciendo que  $\delta$  sea una función de la longitud de onda  $\delta(\lambda)$ . Esto implica que una lámina de onda completa solo puede funcionar según la ecuación (4) para una longitud de onda particular y no para otros colores, produciendo que los retardadores presenten un efecto denominado cromático. Esto produce efectos particulares si los retardadores son utilizados dentro del experimento de Malus con luz blanca polarizada (Figura 1b). Si una lámina de onda completa se coloca en una cierta orientación entre dos polarizadores lineales cruzados, de las longitudes de onda de luz blanca polarizada linealmente que entren a la lámina, solamente la longitud de onda específica que satisfaga la ecuación (4) sufrirá un retardo de  $\lambda$ , por lo que será absorbida por el analizador. Todas las demás longitudes de onda sufrirán alguna retardancia distinta a  $m\lambda$ , emergiendo del retardador de onda con varias formas de polarización elíptica, las cuales, si podrán avanzar a través del analizador, y de donde saldrán del sistema con el color complementario del que fue absorbido (i.e. la combinación de colores del espectro menos el color que fue absorbido por el analizador).

## 3 RETARDADOR DE MEDIA ONDA.

Esta lámina retardadora introduce una diferencia de fase de  $180^\circ$  ( $\pi \text{ rad}$ ) entre las componentes extraordinaria y ordinaria. Supongamos que el plano de vibración de un haz incidente de luz linealmente polarizada forma un ángulo arbitrario  $\theta$  con el eje de la lámina (Figura 2a). Al salir las componentes de la onda de la lámina, se producirá un desfase relativo de  $\lambda/2$ , produciendo que el plano de vibración del campo  $E$  gire un ángulo de  $2\theta$  respecto del ángulo de polarización original. De forma similar, cuando luz elíptica o circular pasa por la lámina, éstas invertirán su sentido de giro.

De lo anterior es evidente que si el espesor de un material es tal que:

$$d(|n_o - n_e|) = (2m + 1)\lambda/2 \quad (5)$$

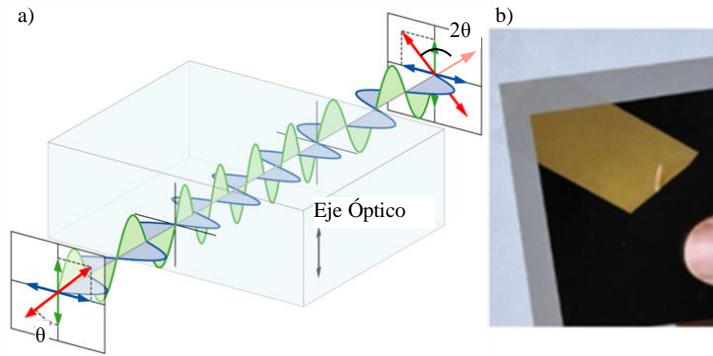


Figura 2. a) Funcionamiento de una lámina de media onda. b) Efecto con polarizadores cruzados.

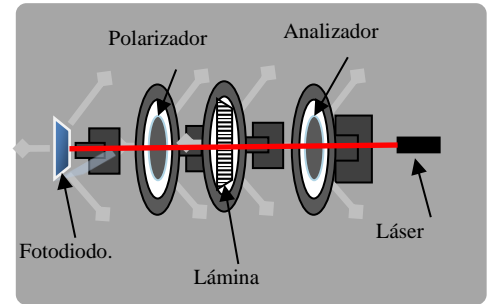


Figura 3. Montaje experimental para lámina de media onda.

Donde  $m=1,2,\dots$ , dicho material funcionará como lámina de  $\lambda/2$ . Se puede realizar una lámina de media onda simple con una tira de celofán común. El celofán se produce en hojas y en el proceso sus moléculas se alinean dotándolo de birrefringencia. El eje rápido, es decir, la dirección de vibración de la componente eléctrica más rápida corresponde a la dirección perpendicular a las cadenas de moléculas, mientras que el eje lento se haya a lo largo de dichas cadenas.

Lo anterior implica que la lámina tiene un eje de preferencia. Si ponemos la lámina de media de onda entre polarizadores lineales cruzados, la lámina no producirá ningún efecto cuando su eje principal (eje óptico) coincida con el eje del polarizador de entrada; sin embargo, si se coloca a  $45^\circ$  respecto al polarizador de entrada, el campo  $E$  que sale de la lámina sufrirá un giro de  $90^\circ$  y entonces saldrá de la lámina con una polarización paralela al eje de transmisión del analizador. Esto implica que la luz pasará a través de la región cubierta por el retardador como si hubiera un agujero en el fondo oscuro de los polarizadores cruzados, Figura 2b. Es decir, la luz lineal incidente paralela al eje principal del material no será afectada por ningún tipo de lámina retardadora (no se puede tener una diferencia de fase relativa sin tener dos componentes).

Así, para probar que algún material actúa como retardador de media onda, es necesario un arreglo experimental tipo Malus, pero con la diferencia de que el retardador se colocará entre el polarizador y el analizador (Figura 3). En el arreglo, es recomendable colocar el polarizador de entrada en dirección vertical (ángulo cero), y la lámina colocarla de forma que su eje (marcado por una flecha en la montura) esté paralelo al polarizador. El analizador también se coloca inicialmente de forma vertical. Con ayuda de un radiómetro, se analiza la irradiancia de salida del sistema como función de la dirección del analizador (Método de Malus). Posteriormente se gira el eje del retardador a otra dirección (se recomiendan las direcciones de  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) y se vuelve a analizar la irradiancia de salida como función del ángulo del analizador. Al observar las gráficas resultado de estas mediciones para cada caso del retardador se puede inferir que efecto tiene sobre la polarización de entrada.

## 4 LÁMINA DE CUARTO DE ONDA.

Es un elemento óptico que introduce un desfase relativo de  $\delta = \pi/2$  entre las componentes ordinaria y extraordinaria. Este desfase de  $90^\circ$  convertirá la luz linealmente polarizada en elíptica y viceversa. Cuando la luz lineal está  $45^\circ$  respecto del eje principal de la lámina y sus componentes ordinaria y extraordinaria tienen amplitudes iguales, un desfase de  $90^\circ$  produce una onda de luz con polarización circular, y dependiendo de cuál de las dos

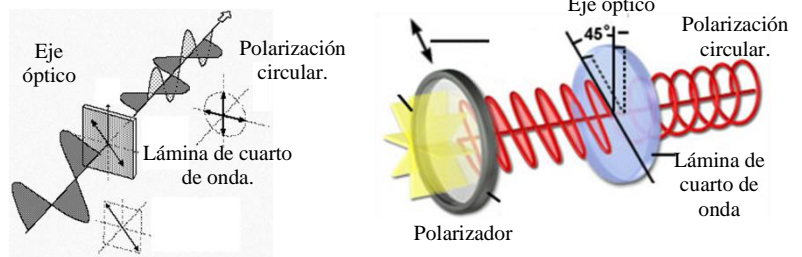


Figura 4. Funcionamiento de una lámina de cuarto de onda.

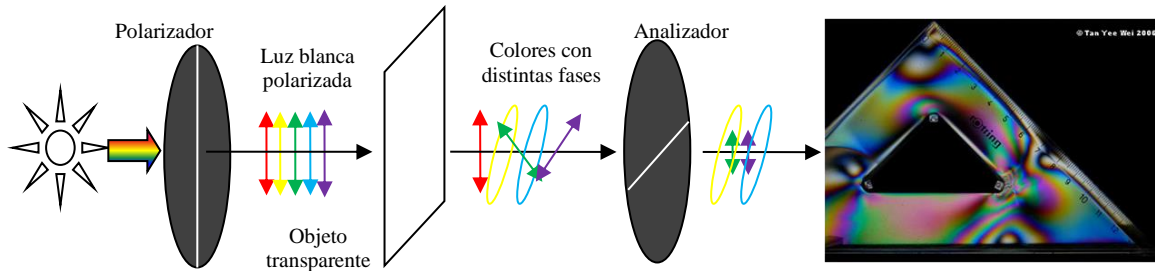


Figura 5. Efecto de Fotoelasticidad.

componentes de la onda se retrase, puede ser *circular derecha* o *circular izquierda*. De manera similar un haz circular incidente emergerá linealmente polarizado (Figura 4). Por lo general las láminas de cuarto de onda se realizan de cuarzo, mica o polímeros orgánicos. El espesor del material birrefringente debe satisfacer la expresión <sup>[1]</sup>:

$$d(|n_o - n_e|) = (4m + 1)\lambda/4 \quad (6)$$

Se puede crear una lámina de cuarto de onda con plástico para envolver alimentos. Al igual que el celofán, tiene surcos longitudinales, los cuales coinciden con un eje principal. Para esto, se deben superponer varias capas (teniendo cuidado en mantener paralelos los surcos) hasta que la irradiancia sea aproximadamente constante conforme se gira el analizador en una prueba de Malus; en ese momento se tendrá luz circular y una lámina de cuarto de onda. Sin embargo, pasar de la teoría a la práctica con luz blanca no es tan sencillo.

Para probar que un material funciona como retardador de cuarto de onda, se utiliza el mismo arreglo y procedimiento que el utilizado para el retardador de media onda, y observando las gráficas de irradiancia de salida para varias situaciones de la dirección del eje del retardador se puede estudiar el efecto sobre la polarización.

## 5 FOTOELASTICIDAD.

Insertando una hoja arrugada de celofán, un pedazo de plástico transparente o una bolsa de plástico transparente (que produzcan birrefringencia) entre dos polarizadores, e iluminando el sistema con luz blanca linealmente polarizada, se producirá una distribución de regiones de colores múltiples que variarán su tonalidad cuando el analizador se gira. Estos colores aparecen debido a la dependencia del retardo de fase con la longitud de onda. La naturaleza variada de los patrones se debe a las variaciones locales del espesor, de la birrefringencia o a ambos (Figura 5). Esta variación de espesor se puede relacionar con la tensión a la que esta sometida el material en dicha región. La aparición de colores de fotoelasticidad es muy común, pudiéndose observar fácilmente en varias sustancias como, por ejemplo: mica, trozos de hielo y cuarzo.

## 6 PRACTICA.

### 6.1 OBJETIVO.

Comprobar el funcionamiento de Láminas retardadoras de fase de  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ . Observar el efecto cromático de plásticos.

### 6.2 MATERIAL.

2 polarizadores. Diodo láser. Bases. Radiómetro. 2 láminas retardadoras de  $\lambda/2$  y 2 láminas de  $\lambda/4$ .

## 7 REFERENCIAS.

- [1] R.A. Serway, R.J. Beichner. *Física para ciencias e ingeniería*. 5° edición, McGraw-Hill. 2002.
- [2] E. Hecht. *Óptica*. 3° edición. Addison Wesley. 2000. E. Hecht. *Óptica*. 3° edición, Addison Wesley. 2000.