

Práctica 6

ESTUDIO DE LÁMINAS RETARDADORAS: LÍNEAS NEUTRAS Y DESFASE

MATERIAL

- Láser ($\lambda=532\text{nm}$)
- Dos polarizadores P_1, P_2
- Lámina retardadora R ($\lambda/4$)
- Fotodetector
- Medidor digital de potencia óptica

OBJETIVO

El objetivo de esta práctica es caracterizar una lámina birrefringente tanto a nivel de localizar la orientación de sus líneas neutras, como de determinar el desfase que introduce y comprobar cómo puede cambiar el estado de polarización de la luz que incida sobre ella.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Láminas Birrefringentes o Retardadoras

Teniendo en cuenta la condición de transversalidad de las ondas electromagnéticas, si consideramos un sistema de coordenadas en el que una onda plana se propaga en la dirección Z , se deduce que el campo eléctrico que representa a dicha onda sólo puede tener componentes E_x y E_y que vendrán dadas por:

$$\begin{aligned}\vec{E}_x &= E_{0x} \cos(kz - \omega t + \delta_x) \hat{i} \\ \vec{E}_y &= E_{0y} \cos(kz - \omega t + \delta_y) \hat{j}\end{aligned}\quad (1)$$

Si el medio es homogéneo e isótropo, ambas componentes se propagarán con la misma velocidad. Las únicas diferencias entre ellas serán las amplitudes y las fases.

Sin embargo, cuando la luz atraviesa un medio cuyo índice de refracción “ n ” depende de la dirección de vibración del campo eléctrico (medio anisótropo), la velocidad a la que se propagan las componentes \vec{E}_x y \vec{E}_y del campo eléctrico total \vec{E} , ya no es la misma. Esto hace que la diferencia de fase que existe entre ellas cambie proporcionalmente a la distancia recorrida d en el medio anisótropo:

$$\delta = \delta_y - \delta_x = \frac{2\pi}{\lambda} (n_y - n_x) d \quad (2)$$

Un **retardador** es un dispositivo óptico que produce un desfase determinado entre las dos componentes ortogonales del campo eléctrico de la onda que incide sobre él. Si dicha onda corresponde a luz polarizada, el desfase introducido cambiará su estado de polarización.

En general se emplean como retardadores las láminas plano paralelas de cristales uniaxiales como cuarzo o calcita, talladas paralelamente a un eje de simetría denominado **eje óptico**. Se utilizan de modo que el haz que incide sobre ellas lo hace en una dirección que es perpendicular a dicho eje óptico. También se les llama láminas birrefringentes. A la dirección

en la que el índice de refracción es menor se le denomina **eje rápido** porque la onda que tiene su campo eléctrico vibrando en esta dirección se propaga a mayor velocidad. A la dirección perpendicular se le llama **eje lento** porque el índice de refracción es mayor y por tanto la velocidad de propagación de la onda que tiene su campo eléctrico vibrando en esta dirección es menor. A ambos ejes, en conjunto, se les denomina **ejes principales del retardador** o también **líneas neutras**.

A la onda que tiene su campo eléctrico vibrando paralelamente al eje óptico se le denomina **onda extraordinaria**, se propaga a una velocidad $v_e = c/n_e$ y a la onda que tiene su campo eléctrico vibrando perpendicularmente al eje óptico se le denomina **onda ordinaria** se propaga a una velocidad $v_o = c/n_o$.

Se denomina **birrefringencia** de un material a la diferencia entre los índices de refracción Δn : $n_e - n_o$. En los cristales con birrefringencia positiva como el cuarzo $n_e > n_o$ y por tanto $v_e < v_o$. En cambio, en los cristales con birrefringencia negativa como la calcita $n_e < n_o$ y por tanto $v_e > v_o$.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

1ª Parte

Para localizar los ejes principales de la lámina retardadora, sus líneas neutras, y posteriormente determinar el desfase que introduce, se realiza el montaje que aparece en la **Figura 1**. La lámina retardadora R se debe colocar entre dos polarizadores que tendrán sus ejes de transmisión perpendiculares entre sí. P1 se pone a 0° y P2 a 90° .

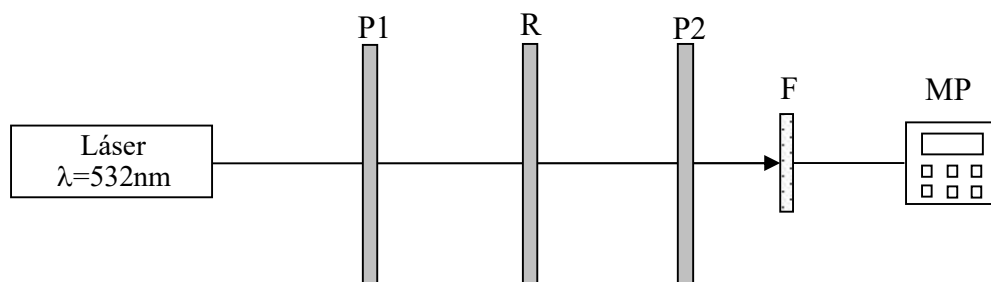


Figura 1: Montaje experimental. P1 y P2 son dos polarizadores. R es una lámina retardadora. F es el fotodetector y MP el medidor de potencia óptica.

En estas condiciones la intensidad que emerge del sistema viene dada por:

$$I = I_{P1} \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \sin^2 (2\alpha) \quad (3)$$

donde I_{P1} , es la intensidad que emerge del primer polarizador con su eje de transmisión a 0° , α es el ángulo que forma uno de los ejes principales de la lámina retardadora R con el eje de transmisión de P1 y δ es el desfase introducido por dicha lámina.

Llamando $y=I/I_{P1}$ a la intensidad normalizada transmitida por el conjunto de elementos y $x=\sin^2(2\alpha)$, la ecuación (3) puede escribirse como $y = m \cdot x$, es decir, representa una recta cuya pendiente, $m=\sin^2(\delta/2)$, permite calcular el desfase δ introducido por la lámina.

1. Localización de las líneas neutras de la lámina retardadora.

En primer lugar, sin poner la lámina retardadora R, comprobaremos que con P₁ a 0° y P₂ a 90° la intensidad transmitida por el conjunto es prácticamente nula, puesto que tenemos sólo dos polarizadores con sus ejes de transmisión perpendiculares.

A continuación, colocaremos la lámina retardadora entre los dos polarizadores y puede ser que ahora la intensidad aumente. Dicha lámina, al introducir un cierto desfase sobre la luz que incide sobre ella, puede cambiar su estado de polarización, al emerger de ella, con lo cual la intensidad total transmitida por todo el conjunto puede no ser nula.

Comenzaremos colocando la lámina a 0° y girándola despacio, pero de forma continua, llegaremos hasta 360° . Lo que va a ocurrir es que la intensidad irá aumentando y disminuyendo. De lo que se trata es de anotar aquellas posiciones angulares de la lámina R en las que de nuevo la intensidad transmitida total se anula o bien alcanza un valor mínimo, si hay una cierta luz ambiente en el laboratorio. Estas posiciones angulares indicarían que a través de la lámina retardadora estaría saliendo de nuevo luz linealmente polarizada igual que la que sale del primer polarizador y por eso al no dejarla pasar el segundo polarizador, se obtiene un mínimo. Las cuatro posiciones angulares de la lámina en las que ocurre esto marcarían dos direcciones que representarían precisamente las líneas neutras de la lámina retardadora R y que están orientadas respecto a los polarizadores P₁ y P₂.

Finalmente de los cuatro ángulos encontrados hay que elegir uno de ellos, por ejemplo el de menor valor, como orientación de referencia para el desarrollo posterior de la práctica y éste corresponderá al ángulo $\alpha=0^\circ$ en la ecuación (3) que es la que se va a utilizar para determinar el desfase de la lámina.

2.- Medidas experimentales para el cálculo del desfase δ de la lámina retardadora.

Se comienza con la lámina retardadora en la misma posición en la que quedó en la etapa de orientación de sus líneas neutras. Al ángulo que aparezca en la escala se le llama $\alpha=0^\circ$ y a continuación se va girando su escala en pasos de 5° hasta llegar a $\alpha=90^\circ$, anotando la intensidad que marque el detector I_{exp} , en la TABLA I.

Posteriormente se deberán corregir estos valores experimentales, teniendo en cuenta que los elementos no son perfectos y absorben parte de la energía por lo que habrá que calcular los

factores de transmisión de los elementos que han intervenido en la medida, es decir el factor de transmisión de la lámina retardadora T_R y el del segundo polarizador T_{P2} .

3. Medida de la intensidad de referencia I_{P1}

Colocando en el montaje sólo el polarizador P_1 a 0° , quitando R y P_2 , medir la intensidad que emerge de él, se la denotará como I_{P1} y se utilizará en cálculos posteriores tal como aparece en la ecuación (3). Para este polarizador no será necesario calcular su factor de transmisión puesto que la intensidad que emerge de él directamente se tomará como referencia.

4. Determinación del factor de transmisión de la lámina retardadora: T_R

La lámina retardadora no es un elemento ideal, si lo fuera, debería transmitir toda la intensidad que le llegara, independientemente de la orientación de sus líneas neutras. Sin embargo, transmite menos, por lo cual tendremos que calcular su factor de transmisión T_R . Para ello se coloca en el montaje el polarizador P_1 a 0° y R a cualquier ángulo (no influye). Se mide la intensidad transmitida, I_t y después para medir la intensidad que le incide, I_i se quita la propia lámina R , puesto que será la transmitida por P_1 . El factor de transmisión será:

$$T_R = \frac{I_t}{I_i} \quad (4)$$

5. Determinación del factor de transmisión del polarizador P_2 : T_{P2}

Si un polarizador fuese ideal, cuando incidiese sobre él un haz de luz linealmente polarizada, vibrando en la misma dirección que su eje de transmisión, debería transmitir toda la intensidad que le llegara. Si no es así, y transmite menos, entonces hay que calcular su factor de transmisión. Quitando la lámina R , se colocará tanto P_1 como P_2 a 90° , es decir, con sus ejes de transmisión paralelos, y se medirá la intensidad transmitida I_{t90} . La intensidad incidente sobre P_2 I_{i90} es la que emerge de P_1 por tanto se quita P_2 dejando sólo P_1 a 90° y se toma la medida. Por lo tanto el factor de transmisión del polarizador P_2 , T_{P2} , será:

$$T_{P2} = \frac{I_{t90}}{I_{i90}} \quad (5)$$

6. Cálculo de la intensidad experimental normaliza y corregida.

En nuestro caso la intensidad experimental normalizada y corregida viene dada por:

$$y = I_{normaliz} = \frac{I_{exp}}{I_{P1} T_R T_{P2}} \quad (6)$$

7. Determinación del desfase experimental con su error $\delta \pm \epsilon\delta$

Introduciendo estos datos en una Hoja Excel se debe hacer la representación gráfica de $y = I_{normalizada}$ frente a $x = \sin^2(2\alpha)$. Obtener mediante un ajuste por mínimos cuadrados la pendiente de la recta con su error y a partir de ella obtener el desfase introducido por la lámina δ con su error, puesto que $m = \sin^2(\delta/2)$

TABLA I. Datos experimentales. α varía desde 0° hasta 90° en pasos de 5°

$\alpha(^{\circ}) \pm \text{Error}$	$\sin^2(2\alpha) \pm \text{Error}$	$I_{exp}(\mu W/cm^2) \pm \text{Error}$	$I_{normaliz} = \frac{I_{exp}}{I_{P1} T_R T_{P2}} \pm \text{Error}$
0			
5			
10			
...			
...			
90			

2ª Parte:

Con el fin de ver que una lámina retardadora puede cambiar el estado de polarización de la luz que incide sobre ella se realizan diferentes pruebas:

Prueba A:

- Se gira el eje de transmisión del polarizador P_1 hasta 45° , con lo cual emergerá luz linealmente polarizada a 45° .
- La lámina retardadora R se deja con la misma orientación de referencia en la que quedó al ajustar sus líneas neutras.
- Se va girando el polarizador P_2 desde 0° hasta 180° en pasos de 10° .
- Se va anotando la intensidad.
- Se hace una representación gráfica de la intensidad emergente frente al ángulo que forma el eje de transmisión del segundo polarizador.
- Viendo esta representación indicar qué tipo de luz polarizada es la que emerge de la lámina R puesto que el segundo polarizador está actuando como analizador de dicho estado.

Prueba B:

- Se gira el eje de transmisión del polarizador P_1 hasta 30° , con lo cual emergerá luz linealmente polarizada a 30° .
- La lámina retardadora R se deja con la misma orientación en la que quedó al ajustar sus líneas neutras.
- Se va girando el polarizador P_2 desde 0° hasta 180° en pasos de 10° .
- Se va anotando la intensidad.
- Se hace una representación gráfica de la intensidad emergente frente al ángulo que forma el eje de transmisión del segundo polarizador respecto a la vertical.
- Viendo esta representación indicar qué tipo de luz polarizada es la que emerge de la lámina R puesto que el segundo polarizador está actuando como analizador de dicho estado.