

SESIÓN Nº 11: POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN.

TRABAJO PREVIO

1. Conceptos fundamentales
2. Cuestiones



1. Conceptos fundamentales

- **Luz natural:** vector eléctrico vibrando en todas las direcciones del plano perpendicular a la dirección de propagación.

- **Estados de polarización de la luz:** obtenidos por superposición de ondas electromagnéticas luminosas de la misma frecuencia cuyos vectores eléctricos vibran en direcciones perpendiculares. Clasificación de estados puros: luz linealmente polarizada, elípticamente polarizada y circularmente polarizada.

- **Luz linealmente polarizada:** vector eléctrico vibrando según una única dirección, equivalente a superposición de ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores perpendiculares, desfasados 0 o π radianes. Se adopta el convenio de cargar la fase sobre la componente y ($\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$). La figura 12.1b muestra una vista frontal de una luz linealmente polarizada cuya dirección de vibración forma un ángulo α con el eje x (izquierda) y una vista completa de una luz linealmente polarizada vibrando según el eje y (derecha).

Desfase 0 (vibración en 1º y 3º cuadrantes)

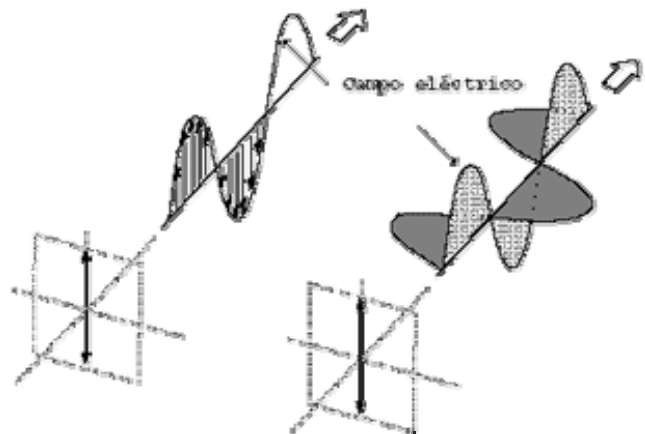
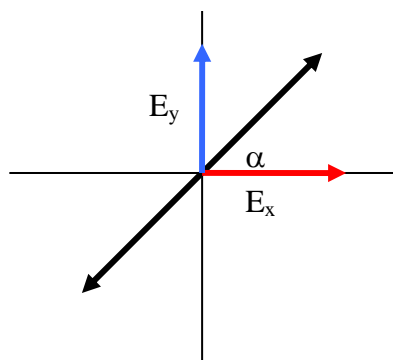


Figura 11.1

- **Luz elípticamente polarizada:** vector eléctrico cuyo extremo describe una trayectoria elíptica, equivalente a superposición de ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores eléctricos perpendiculares desfasados un ángulo entre 0 y π (sentido horario o

dextrógiro de giro sobre la elipse) o entre π y 2π (sentido antihorario o *levógiro* de giro sobre la elipse). En la figura 11.2 vemos tres fases consecutivas de movimiento en vista frontal para un desfase de $\pi/2$ (izquierda), y una vista completa de una luz polarizada elíptica con desfase de $3\pi/2$ (derecha).

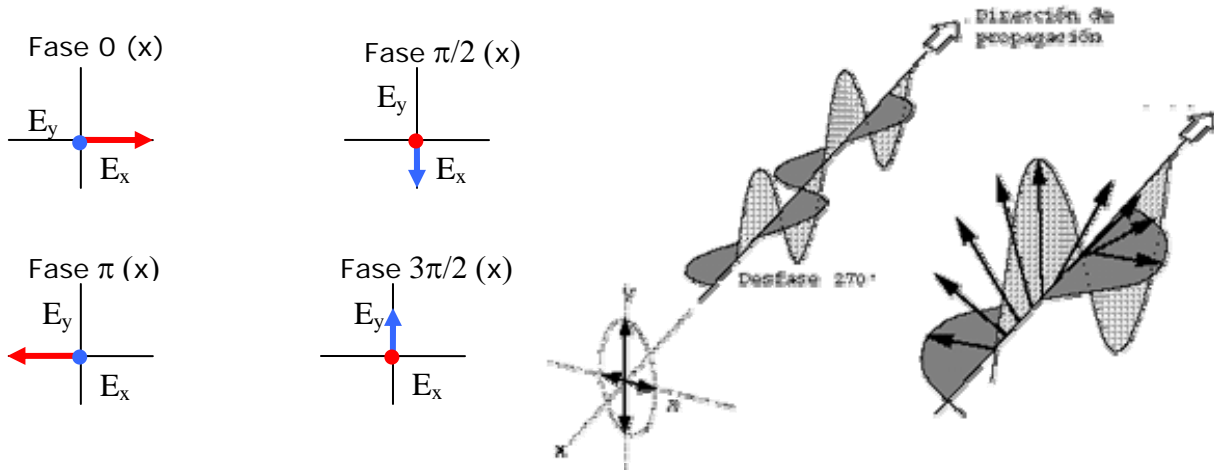


Figura 11.2

-Luz circularmente polarizada: vector eléctrico cuyo extremo describe una trayectoria circular, equivalente a superposición de ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores eléctricos perpendiculares de igual amplitud desfasados un ángulo $\pi/2$ (sentido horario o *dextrógiro* de giro) o $3\pi/2$ (sentido antihorario o *levógiro* de giro). Así, si el desfase es $\pi/2$ o $3\pi/2$, la luz será polarizada elíptica si las dos componentes no tienen igual amplitud, y circular si tienen igual amplitud.

La luz puede encontrarse en estados puros o mezcla de estados de polarización.

• **Obtención de luz polarizada: polarizadores lineales.** Los polarizadores (figura 11.3) son dispositivos que seleccionan una particular dirección de vibración de la luz, de forma que tras atravesarlos luz natural emerge linealmente polarizada en la dirección seleccionada mediante la orientación del *EJE DE TRANSMISIÓN* del polarizador. El eje perpendicular al de transmisión se denomina Eje de extinción. Hay una variedad de métodos para conseguir esta selección, entre los que destacan la absorción selectiva por dicroísmo (más común), reflexión con ángulo de Brewster, polarización por dispersión.



Figura 11.3

-Si sobre un polarizador lineal incide luz linealmente polarizada, la intensidad transmitida resulta:

$$I_t = I_o \cdot \cos^2 \alpha \quad (11.1)$$

donde α es el ángulo formado entre la dirección de vibración de la luz incidente y el eje de transmisión del polarizador. De la ecuación 11.1 se deduce que si colocamos dos polarizadores con sus ejes de transmisión formando 90° , no habrá luz transmitida por el segundo polarizador. Si sobre un polarizador incide luz circularmente polarizada, al girar el eje del polarizador la intensidad transmitida no varía.



Figura 11.4

• **Obtención de luz polarizada: láminas retardadoras.**

Las láminas retardadoras (figura 11.4) están formadas por materiales birrefringentes (generalmente medios cristalinos anisótropos) que se tallan de forma que al incidir normalmente un haz de luz a su paso por el medio las componentes que vibran según los ejes privilegiados o

LÍNEAS NEUTRAS de la lámina emergen con un cierto desfase entre ellas, que se calcula como:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) d \quad (11.2)$$

donde Δ es la diferencia de camino óptico en el interior de la lámina entre la componente que presenta índice de refracción n_e y la componente que presenta índice n_o . Estos dos ejes o líneas neutras de la lámina también se denominan eje rápido y lento. El factor $n_e - n_o$ es la *birrefringencia* de la lámina (diferencia de índices de refracción entre las líneas neutras) y d es el espesor de la lámina. Si la luz incide vibrando según el eje *óptico* de la lámina, ésta se comporta como si fuera un medio homogéneo e isótropo con índice n_o . Como se deduce de la ecuación 11.2, el desfase depende de la longitud de onda de la luz incidente. Los retardadores más habituales son las *láminas de $\lambda/4$* , que introducen un desfase de $\pi/2$ para una determinada longitud de onda.

- Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada, a la salida se obtiene luz circularmente polarizada si la dirección de vibración de la luz incidente forma 45° con alguna de las líneas neutras, puesto que a la salida de la lámina tendremos dos componentes de igual amplitud desfasadas 90° .

- Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada formando cualquier otro ángulo no nulo con las líneas neutras, a la salida obtendremos luz elípticamente polarizada.

- Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada según una de sus líneas neutras, la lámina no tendrá ningún efecto sobre la luz incidente.

• **Reflexión y refracción en medios dieléctricos homogéneos e isótropos.**

Para una luz que incide sobre la interfase o superficie de separación de dos medios homogéneos e isótropos, generalmente se considera por separado el comportamiento de la componente del vector eléctrico paralela y perpendicular al *plano de incidencia* (plano que contiene a la normal, el rayo incidente y el refractado o reflejado). En la figura 11.5 vemos una onda incidente y la descomposición correspondiente en componentes paralelas (en verde) y perpendiculares (en azul) al plano de incidencia.

Tras reflejarse en una interfase de este tipo, la luz puede sufrir cambios de fase y modificar su amplitud de acuerdo a los coeficientes que obtuvo Fresnel para ambas componentes por separado (fórmulas de Fresnel):

$$r_{\parallel} = \frac{A_{\parallel}^r}{A_{o\parallel}} = \frac{\operatorname{tg}(\theta' - \theta)}{\operatorname{tg}(\theta' + \theta)} \quad (11.3)$$

$$r_{\perp} = \frac{A_{\perp}^r}{A_{o\perp}} = \frac{\operatorname{sen}(\theta' - \theta)}{\operatorname{sen}(\theta' + \theta)} \quad (11.4)$$

donde A_{\parallel}^r es la amplitud de la componente paralela al plano de incidencia de la luz reflejada, $A_{o\parallel}$ es la componente paralela al plano de incidencia de la luz incidente, y análogamente para las componentes perpendiculares al plano de incidencia. Para una interfase que separa medios de índices n y n' , con $n < n'$, se produce un salto de fase de π en la reflexión para ambas componentes, y cambios en la amplitud de las mismas, por lo que podemos deducir que si la luz incidente es linealmente polarizada, la reflejada será también linealmente polarizada pero con distinta dirección de vibración.

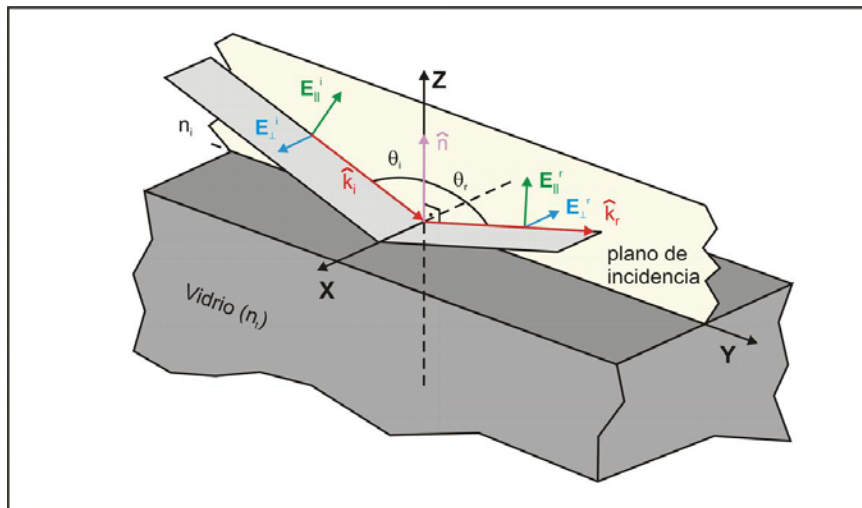


Figura 11.5

Para la componente paralela, se da además una circunstancia de especial interés, cuando el ángulo de incidencia y el de refracción son complementarios ($\theta + \theta' = \pi/2$). Como puede deducirse de aplicar (11.3) en este caso, la componente paralela de la luz reflejada se anula. El ángulo de incidencia correspondiente se denomina *ángulo de Brewster*, y aplicando la ley de Snell podemos expresarlo en función de los índices de los medios que separa la interfase, como:

$$\theta_B = \operatorname{arctg}\left(\frac{n'}{n}\right) \quad (11.5)$$

Si incidimos con luz natural y ángulo de Brewster, obtenemos luz reflejada linealmente polarizada, dado que se anulan todas las componentes paralelas al plano de incidencia. Tenemos entonces un nuevo método de obtención de luz linealmente polarizada.

• Reflexión y refracción en medios metálicos.

Para incidencia sobre un metal (medio conductor), puede obtenerse una generalización de las fórmulas de Fresnel teniendo en cuenta que debido a la absorción en el interior del metal, el índice de refracción asociado es complejo, y por tanto también lo es el ángulo de refracción. Esto implica que en general las amplitudes reflejadas A_{\parallel}^r y A_{\perp}^r son complejas, y cuando incidimos con luz linealmente polarizada sobre un metal obtenemos (salvo para incidencia normal o rasante) luz reflejada elípticamente polarizada. La razón de ambas componentes puede expresarse en función del número complejo $a-ib$, producto del índice de refracción complejo ($\tilde{n}=n-ik$) por el coseno del ángulo de refracción:



Figura 11.6

$$\frac{A_{\perp}^r}{A_{\parallel}^r} = \frac{A_{o\perp}(a \cos \theta + \sin^2 \theta - ib \cos \theta)}{A_{o\parallel}(a \cos \theta - \sin^2 \theta - ib \cos \theta)} \quad (11.6)$$

Del estudio de la luz reflejada en un metal (elipsometría) pueden obtenerse los valores de las *constantes ópticas* de los metales, n y k .

2. Cuestiones

1. Especifica el estado de polarización y dirección de vibración de una luz cuyo campo eléctrico tiene las siguientes componentes:

$$E_x = 3 \sin(\omega t - kx)$$

$$E_y = 4 \sin(\omega t - kx + \frac{\pi}{3})$$

2. Calcula la intensidad transmitida por los siguientes dispositivos, iluminados por una fuente de Na de intensidad I_0 , linealmente polarizada a 45° con el eje x:
 - a) Polarizador lineal a 30° con el eje x.
 - b) Lámina de cuarto de onda para el Na con las líneas neutras en los ejes x e y.
3. Calcula las amplitudes de las componentes paralela y perpendicular para una luz de Na linealmente polarizada a 30° con el plano de incidencia, para una interfase aire-vidrio Crown ($n=1.523$) que incide con $\theta=45^\circ$. ¿Hay salto de fase por reflexión?
4. Determina el ángulo de Brewster para luz láser de He-Ne en una interfase aire-agua (considera $n_{\text{agua}}=1.3296$).
5. Calcula el ángulo de refracción para luz de Na que incide con $\theta=40^\circ$ en una interfase aire-plata ($n=0.18$, $k=3.67$). ¿Cuál es el estado de polarización resultante en la luz reflejada para esta incidencia?



GUIÓN DE LA SESIÓN DE PRÁCTICAS Nº 11

Objetivo de la práctica

Caracterización del estado de polarización de la luz reflejada por superficies de vidrio y metálicas cuando incide sobre ellas luz linealmente polarizada. Medida del ángulo de Brewster para una interfase aire-vidrio.

Realización del experimento

A) Puesta a punto del espectrogoniómetro.

El proceso de puesta a punto del espectrogoniómetro se ha descrito en el guión de la práctica 4, pero lo recordamos a continuación.

Tras encender la fuente de Na y esperar unos minutos para que se estabilice, se procede a asegurarnos de que vemos nítido el retículo situado en el ocular del telescopio. Una vez conseguido esto, deberemos enfocar al infinito (o a un objeto muy lejano) el telescopio. Después, sin tocar la parte del telescopio, se coloca el colimador con la rendija adosada tras la lámpara de descarga, y se modifica la distancia colimador-rendija mediante el correspondiente tornillo hasta que la rendija se vea nítida a través del telescopio. Una vez completada la puesta a punto, no deben desplazarse más los tornillos ya sea del telescopio como del colimador.

Tras realizar la puesta a punto del instrumento, se procede a montar los polarizadores lineales acoplados al colimador y al telescopio, verificando que el que se acople al telescopio sea el que ofrece una mayor facilidad de desplazamiento del eje de transmisión. Los polarizadores se fijan a las monturas del colimador y telescopio por medio de los correspondientes tornillos.

B) Comprobación del funcionamiento de polarizadores y lámina de media onda.

Tras haber montado los dos polarizadores, observamos la rendija a través del telescopio. Rotando el eje de transmisión del polarizador acoplado al telescopio, medimos el ángulo correspondiente a intensidad mínima transmitida por ambos polarizadores. Este mínimo, que en teoría debería ser nulo, corresponde a una posición tal que los ejes de transmisión de los dos polarizadores están cruzados (forman 90°). En la práctica observamos que no es totalmente nulo, debido en parte a que la luz de la fuente no es completamente monocromática. Se mide el ángulo de orientación del eje del polarizador que corresponde a este mínimo, y se realizan las oportunas deducciones sobre la orientación del eje de transmisión del polarizador acoplado al colimador.

Después, montamos la lámina $\lambda/4$ sobre la plataforma del espectrogoniómetro, y volvemos a observar la rendija a través del telescopio. Cambiando la orientación de las líneas neutras, encontraremos una dirección para la cual la luz emergente de la lámina es circularmente polarizada (esto ocurre si el eje de transmisión del primer polarizador forma 45° con las líneas neutras). Entonces, girando el eje de transmisión del polarizador acoplado al

telescopio no observaremos variaciones de intensidad en la luz transmitida. Nuestro método para conseguir esto será ir variando progresivamente la posición de las líneas neutras y girando el segundo polarizador cada vez, hasta que encontremos que la intensidad se mantiene igual durante el proceso de giro. Observamos entonces la dirección indicada en la lámina para las líneas neutras, y vemos si concuerda con las predicciones teóricas de acuerdo con la dirección calculada previamente para el eje de transmisión del polarizador acoplado al colimador. Si hay discordancia, se reflexiona sobre las posibles causas más probables.

C) Caracterización de la luz reflejada en una superficie metálica.

Se trata de determinar el estado de polarización de la luz reflejada en una superficie metálica (espejo de primera superficie) cuando sobre ella incide luz linealmente polarizada. Para esta parte del experimento, colocaremos el espejo sobre la plataforma del espectrogoniómetro, de forma que podamos incidir sobre su superficie con la luz linealmente polarizada proveniente del colimador. Moviendo el telescopio, buscamos el reflejo de la rendija en el espejo, y una vez localizado, giramos el eje de transmisión del polarizador acoplado al telescopio. Debemos determinar si nuestra observación coincide con lo esperado según la teoría detallada en el trabajo previo sobre el estado de polarización previsto para el haz reflejado, teniendo en cuenta que si el haz reflejado es linealmente polarizado, obtendremos un mínimo casi nulo girando el segundo polarizador; si el haz es circularmente polarizado, no habrá variaciones de intensidad, como se ha comprobado en la parte B); si el haz es elípticamente polarizado, encontraremos un máximo y un mínimo no nulo de intensidad, en direcciones que forman 90° (ejes propios de la elipse de polarización).

Tras realizar las pruebas pertinentes, anotaremos las observaciones y deducciones sobre el estado de polarización del haz reflejado.

D) Caracterización de la luz reflejada en una superficie de vidrio.

Sustituyendo el espejo de primera superficie por la lámina plano-paralela de vidrio, operamos como en el apartado C) para localizar el haz reflejado en la primera cara de la lámina y caracterizar su estado de polarización, discutiendo si concuerda con lo esperado según la teoría y especificando los ejes significativos de dicho estado. También se debe reflexionar sobre los cambios introducidos en dichos ejes y sus causas.

E) Medida del ángulo de Brewster para una interfase aire-vidrio y del índice de refracción del vidrio.

Utilizamos para esta medida el hecho de que si incide luz natural con ángulo de Brewster sobre la lámina de vidrio, la luz reflejada será linealmente polarizada. Para asegurar que incida luz natural, desmontamos el polarizador acoplado al colimador. Vamos luego variando progresivamente el ángulo de incidencia y comprobando el estado de polarización del haz reflejado, hasta conseguir una luz reflejada linealmente polarizada (mínimo nulo o casi nulo para una determinada posición del eje de transmisión del polarizador acoplado al telescopio). Es interesante realizar una estimación previa del valor previsto para el ángulo de Brewster en una interfase aire-vidrio (con índice de refracción próximo a 1.5). Tomamos la lectura angular de la escala para la posición del haz

reflejado, quitamos la lámina de vidrio del soporte y, sin mover la plataforma de apoyo de la lámina, medimos la posición angular opuesta al haz incidente, o directamente la del haz incidente, como se muestra en la figura 11.7.

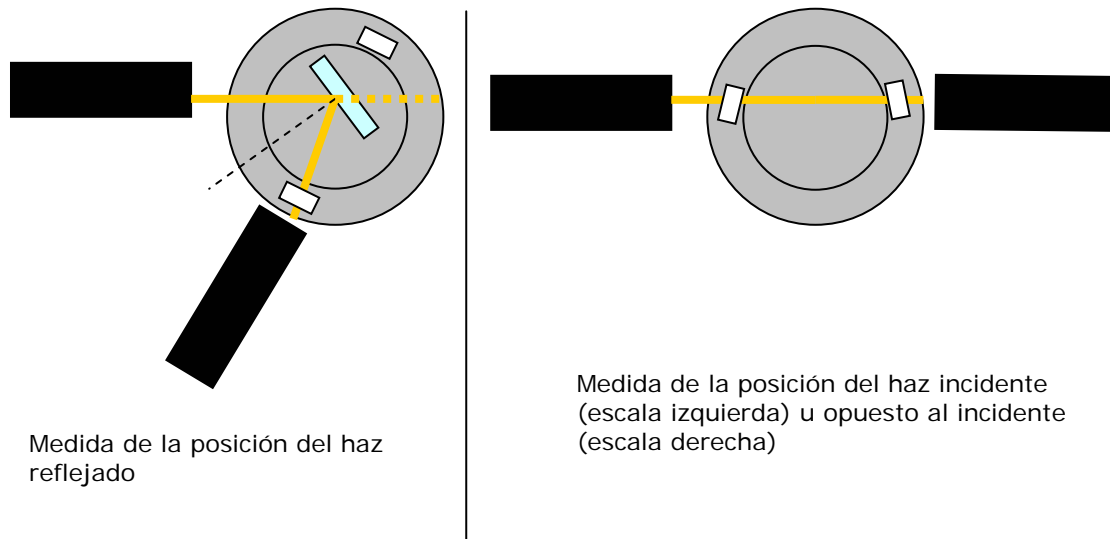


Figura 11.7

A partir de estos datos, es muy sencillo calcular el ángulo de incidencia (ángulo de Brewster), con su error asociado, y por tanto el índice de refracción del vidrio utilizando la ecuación (11.5) del trabajo previo.

Nos planteamos ahora otro método posible de medida del ángulo de Brewster sin desmontar el polarizador del colimador, y una vez pensado el procedimiento lo llevamos a cabo y comparamos la medida obtenida con la anterior.

