

# Tema 11.- REFLEXIÓN, REFRACCIÓN Y POLARIZACIÓN (RESUMEN)

## • Polarización

Las ondas electromagnéticas (e.m.) son ondas transversales. Si la vibración de una onda transversal se mantiene paralela a una línea fija en el espacio, la onda está *polarizada linealmente*. La dirección de polarización se define según el vector **E**.

Una onda está *polarizada circularmente* cuando el vector **E** mantiene su módulo fijo, mientras que su dirección gira en el espacio con una frecuencia angular constante. La punta del vector **E** describe una circunferencia.

Una onda *polarizada elípticamente* es similar a una onda polarizada circularmente salvo que las componentes  $E_y$  y  $E_z$  del vector campo eléctrico **E** tienen amplitudes diferentes. En este caso el vértice del vector **E** describe una elipse.

*Elipse de polarización*

$$\frac{E_y^2}{A_y^2} + \frac{E_z^2}{A_z^2} - 2 \frac{E_y E_z}{A_y A_z} \cos \delta = \sin^2 \delta$$

Campo eléctrico:  $\mathbf{E}(x,t) = E_y \mathbf{u}_y + E_z \mathbf{u}_z$

$$E_y = A_y \cos \left( t - \frac{x}{c} + \phi_y \right) \quad E_z = A_z \cos \left( t - \frac{x}{c} + \phi_z \right)$$

Si  $\delta = 2m\pi$ , con  $m$  un entero: onda polarizada linealmente en los cuadrantes 1 y 3.

Si  $\delta = (2m+1)\pi$ , con  $m$  un número entero: onda polarizada linealmente en los cuadrantes 2 y 4.

Cuando  $A_y = A_z$  y  $\delta = (2k+1)\pi/2$  la elipse se convierte en una circunferencia, obteniéndose una onda polarizada circularmente.

## • Medida de la polarización. Ley de Malus

La luz puede polarizarse cuando se hace pasar a través de un *polarizador* (lineal), el cuál transmite selectivamente luz que tiene su plano de polarización paralelo al *eje de transmisión del polarizador*. La luz que tiene su plano de polarización perpendicular al eje de transmisión queda bloqueada. Si un haz de luz no polarizada (*luz natural*) incide sobre un polarizador, éste deja pasar la mitad de la intensidad de la luz incidente.

*Ley de Malus*

Si la luz polarizada mediante un polarizador pasa a través de un segundo polarizador, denominado *analizador*, y los ejes de transmisión del polarizador y el analizador forman un ángulo  $\theta$ , se cumple:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Grado de polarización ( $0 \leq P \leq 1$ )

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$

$I_{\parallel}$  es la intensidad medida por el detector para los ejes de transmisión del polarizador y el analizador paralelos ( $\theta = 0^\circ$ ), e  $I_{\perp}$  cuando estos ejes son perpendiculares ( $\theta = 90^\circ$ ), suponiendo que el polarizador no es ideal pero sí lo es el analizador.

## • Reflexión y refracción de ondas electromagnéticas

*Reflexión de ondas e.m.:* las direcciones de propagación de las ondas incidente y reflejada y la normal a la superficie están en un mismo plano (*plano de incidencia*) y además  $\theta_1 = \theta_2$ .

*Refracción de ondas e.m.:* las direcciones de propagación de las ondas incidente y refractada o transmitida y la normal a la superficie están en un mismo plano (*plano de incidencia*) y además  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  (ley de Snell).

*Fórmulas de Fresnel*

Coefficientes de reflexión,  $r$ , y de refracción o transmisión,  $t$ ,

(razón de la amplitud reflejada a la incidente, y de la amplitud transmitida a la incidente, respectivamente) para medios no magnéticos ( $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ ):

$$r_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}$$

$$t_{\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}$$

$$r_{\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$t_{\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

Es posible conseguir que  $r_{\parallel} = 0$ . En esta situación la onda reflejada no tiene componente eléctrica del tipo  $E_{r\parallel}$ , sino sólo la  $E_{r\perp}$ , y la onda reflejada está totalmente polarizada en un plano perpendicular al plano de incidencia (modo *TE*). Para que se cumpla  $r_{\parallel} = 0$  necesario que  $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$ . Esta situación implica que:

$$\tan \theta_1 = n_2/n_1$$

Esta ecuación que recibe el nombre de *Ley de Brewster* y el ángulo de incidencia que cumple la ecuación anterior recibe el nombre de *ángulo de polarización* o *ángulo de Brewster*. Si además la onda incidente no tiene componente  $E_i$  (modo *TM*) entonces no existe onda reflejada si se incide con el ángulo de Brewster.

Los *factores de reflexión*,  $R$ , y *transmisión*,  $T$ , relacionan las intensidades incidente, reflejada y transmitida. Por el principio de conservación de la energía  $R + T = 1$ .  $R$  y  $T$  se calculan mediante:

$$R = |r|^2 \quad \text{y} \quad T = 1 - |r|^2$$

## • Métodos para polarizar la luz

Entre los fenómenos más utilizados para producir luz polarizada figuran la polarización por reflexión, la absorción selectiva y la refracción en medios anisótropos.

## • Retardadores y polarizadores circulares

Retardo de fase entre las ondas ordinaria y extraordinaria que atraviesan un medio anisótropo de espesor  $d$ :

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_E - n_O) d$$

*Lámina de cuarto de onda. Polarizador circular*

$$d = \frac{\lambda}{4(n_E - n_O)}$$

*Lámina de media de onda. Rotor*

$$d = \frac{\lambda}{2(n_E - n_O)}$$

## • Actividad óptica

Ley de Biot:  $\alpha = d[c]$

## • Efecto Faraday

$$\alpha = V B d$$