

# Capítulo 4

## Polarización de la luz. Birefringencia. Efectos ópticos inducidos.

### 4.1 Polarización de la luz

Como todas las ondas transversales, la luz puede estar polarizada o no. El estado de polarización de las ondas luminosas está caracterizado por la orientación de su campo óptico  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  que, en último término depende de la relación entre las amplitudes y fases de sus componentes.

En el caso de la luz monocromática, y escogiendo un sistema de referencia con el eje  $z$  paralelo a la dirección de propagación de la onda, de manera que  $\vec{k} = k \hat{k}$ , se puede escribir

$$\vec{E}(z, t) = \vec{\mathcal{E}}(z) e^{-i\omega t} = \underbrace{\mathcal{E}_x(z)}_{E_{0x} e^{i(k^x z + \phi_x)}} e^{-i\omega t} \hat{i} + \underbrace{\mathcal{E}_y(z)}_{E_{0y} e^{i(k^y z + \phi_y)}} e^{-i\omega t} \hat{j}$$

donde  $k^x$  y  $k^y$  son los números de onda correspondientes a las dos componentes de la onda, que en los medios isótropos tienen valores iguales, pero en los anisótropos pueden tomar valores diferentes.

En función del desfase que exista entre las componentes

$$\theta = \phi_x - \phi_y + (k^x - k^y) z = \arg \left( \frac{\mathcal{E}_x(z)}{\mathcal{E}_y(z)} \right)$$

y de la relación entre sus amplitudes reales

$$\frac{E_{0x}}{E_{0y}} = \left| \frac{\mathcal{E}_x(z)}{\mathcal{E}_y(z)} \right|$$

la onda tendrá polarización lineal, circular o elíptica:

- Polarización lineal si  $\left\{ \begin{array}{l} \theta = 0 \\ \theta = \pi \end{array} \right\}$
- Polarización circular si  $\left\{ \begin{array}{l} \theta = \frac{\pi}{2} \\ \theta = \frac{3\pi}{2} \end{array} \right\}$  y  $\frac{E_{0x}}{E_{0y}} = 1$
- Polarización elíptica en cualquier otro caso.

En los medios isótropos la velocidad de la luz es la misma para todas las componentes de una onda monocromática y, por tanto, el número de onda es el mismo para ambas

$$\left. \begin{array}{l} v^x = v^y \\ \omega^x = \omega^y \end{array} \right\} \Rightarrow k^x = \frac{\omega^x}{v^x} = \frac{\omega^y}{v^y} = k^y = k$$

y el desfase entre las componentes es independiente de la posición  $z$

$$\theta = \phi_x - \phi_y$$

es decir, *en un medio isótropo el estado de polarización de la luz es el mismo en todos los puntos de su trayectoria.*

La luz monocromática tiene siempre un estado de polarización definido (lineal, circular o elíptico). Por su parte, la luz policromática sólo está polarizada totalmente cuando todas sus componentes espectrales tienen el mismo estado de polarización, en caso contrario se dice que está parcialmente polarizada y se define su *grado de polarización*.

Se suele llamar «luz polarizada» a la polarizada linealmente, en los demás casos se especifica el tipo de polarización («luz polarizada circularmente» o «luz polarizada elípticamente»).

## 4.2 Polarizadores lineales

Se llama polarizador a cualquier dispositivo óptico que, a partir de una entrada de luz natural (no polarizada) o con un estado de polarización arbitrario, proporciona a su salida luz con un estado de polarización determinado. Se habla así de polarizadores lineales, circulares o elípticos.

Al igual que sucede con los estados de polarización, se suele llamar simplemente «polarizador» a los polarizadores lineales y para los demás se especifica si son «polarizadores circulares» o «polarizadores elípticos»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>No es frecuente encontrar los polarizadores elípticos como dispositivos comerciales.

Algunos de los principales mecanismos físicos que alteran el estado de polarización de la luz son: el dicroísmo (o absorción selectiva), la reflexión con el ángulo de Brewster, la birefringencia y la difusión.

### 4.2.1 Polarizador lineal

Se llama polarizadores lineales a aquéllos a cuya salida se tiene únicamente la componente del campo óptico entrante que es paralela a un *eje de transmisión* característico del polarizador.

### 4.2.2 Ley de Malus

Cuando una onda luminosa polarizada linealmente incide en un polarizador lineal de forma que el plano de polarización de la onda forma un ángulo  $\theta$  con el eje de transmisión de polarizador, la onda emergente tiene:

- Polarización lineal paralela al eje de transmisión del polarizador.
- Amplitud proporcional al coseno del ángulo  $\theta$

$$E_{0e}(\theta) = E_{0i} \cos \theta$$

e irradiancia

$$I(\theta) = \frac{1}{2} v \varepsilon E_{0e}^2(\theta) = \frac{1}{2} v \varepsilon (E_{0i} \cos \theta)^2 = \left( \frac{1}{2} v \varepsilon E_{0i}^2 \right) \cos^2 \theta$$

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

que es la *Ley de Malus*.

La máxima irradiancia de salida se tiene para  $\theta = 0$ . En un polarizador ideal ésta sería la irradiancia de la onda incidente, en los polarizadores reales es ligeramente inferior debido a la absorción en el material, las reflexiones indeseadas, etc.

### 4.2.3 Polarizadores lineales por absorción selectiva

Se construyen con materiales dicroicos, que son prácticamente transparentes a la componente de la onda con polarización paralela a una cierta dirección (el eje de transmisión) relacionada con la estructura del material y opacos a la componente con polarización perpendicular, cuya energía absorben. La

luz que atraviesa este tipo de materiales emerge oparizada linealmente en un plano paralelo al eje de transmisión. En general, cuanto mayor es el espesor del material mayor es el grado de polarización obtenido.

Ejemplos de este tipo de polarizadores son:

- Las rejillas de filamentos conductores, cuya separación ha de ser comparable a la longitud de onda para que sean efectivos. Funcionan bien disipando por efecto Joule la energía de la componente con polarización paralela a los filamentos o bien reemitiéndola en forma de onda reflejada y, en consecuencia, dejan pasar solamente la componente polarizada perpendicularmente a los mismos. Existen algunos modelos comerciales de polarizadores de este tipo para frecuencias ópticas que se construyen depositando una matriz de finísimos filamentos de aluminio u oro sobre una placa de vidrio mediante técnicas similares a las empleadas en microelectrónica.
- Los cristales dicroicos naturales como la turmalina o la herapatita. No son polarizadores demasiado efectivos y actualmente no se emplean como tales.
- Los materiales dicroicos artificiales. Los primeros materiales de este tipo fueron las láminas Polaroid inventadas por Edwin H. Land en 1938, actualmente existen materiales similares de otros fabricantes. En general se obtienen embebiendo microcristales dicroicos o conductores convenientemente orientados en una matriz de polímero o vidrio, o bien provocando mediante reacciones químicas que algunas de las cadenas de un polímero lineal, también orientadas convenientemente, se vuelvan conductoras. El resultado final es un material que se comporta macroscópicamente de manera análoga a un rejilla de filamentos conductores.

#### 4.2.4 Polarizadores lineales por reflexión

Ya hemos visto, al analizar las fórmulas de Fresnel, que cuando la luz se refleja con el ángulo de Brewster el haz reflejado está completamente polarizado perpendicularmente al plano de incidencia. En estas condiciones, sólo se refleja una fracción pequeña de la potencia incidente y el haz transmitido sólo se polariza un poco paralelamente al plano de incidencia. Con cada nueva reflexión con el ángulo de Brewster el haz transmitido se polariza un poco más y, después de múltiples reflexiones, puede llegar a tener un elevado grado de polarización.

Los polarizadores por reflexión más utilizados son las ventanas de Brewster y los polarizadores de pilas de placas. Las ventanas de Brewster son láminas gruesas de caras planoparalelas que generalmente se utilizan insertadas en las cavidades de los láseres para polarizar su salida; la luz recorre muchas veces la cavidad antes de ser emitida y así se polariza progresivamente pasada a pasada. Los polarizadores de pilas de placas se emplean como polarizadores de alta potencia, ya que en la polarización por reflexión no absorben energía y apenas se calientan aunque los atraviese una potencia considerable; trabajando en transmisión con un número moderado de placas no son muy eficientes, pero resultan más económicos que otros tipos de polarizadores de potencia (p.ej. interferenciales o por birrefringencia). Un diseño cuidadoso de la pila de placas permite evitar que la luz reflejada pueda llegar a alcanzar la salida así como que el haz se desvíe de su trayectoria original al atravesar el polarizador.

#### 4.2.5 Polarizadores lineales por birrefringencia

Los materiales birrefringentes, que estudiaremos en mayor detalle un poco más adelante, son medios anisótropos que presentan índices de refracción diferentes para las componentes del campo óptico con polarizaciones perpendicular y no perpendicular a una dirección característica denominada «eje óptico» del material.

Cuando la luz se refracta en uno de estos materiales se produce el fenómeno de la «doble refracción», esto es, el haz incidente se separa en dos con polarizaciones perpendiculares ente sí que se denominan:

- Haz ordinario: el que tiene polarización perpendicular al eje óptico del material y que se refracta según lo que cabría esperar de la ley de Snell que conocemos para medios isótropos.
- Haz extraordinario: tiene polarización no perpendicular, aunque no necesariamente paralela, al eje óptico y se refracta de forma diferente.

Si se hace que los haces refractados se separen lo suficiente, o bien si uno de ellos se bloquea, se consigue polarizar de una manera práctica la luz incidente.

El material birrefringente más utilizado para la construcción de polarizadores es una variedad de la calcita que forma grandes cristales transparentes y que se denomina «espato de Islandia». La calcita se talla en forma de prismas con ángulos adecuados y se alterna con capas de aire o de otros materiales como el vidrio o el bálsamo de Canadá (una resina transparente con

un índice de refracción muy parecido al del vidrio) para conseguir separar los haces polarizados mediante reflexión total de uno de ellos o bien para desviarlos simétrica o asimétricamente (como, por ejemplo, en los prismas de Wollaston y de Rochon, respectivamente).

#### 4.2.6 Polarizadores lineales por interferencia

Son dispositivos polarizadores diseñados para trabajar con una longitud de onda y un ángulo de incidencia determinados.

Están constituidos por una o varias películas delgadas de materiales dieléctricos cuyos espesores e índices de refracción se calculan para que las componentes  $\pi$  de los haces *reflejados* en las dos caras de la lámina interfieran destructivamente de manera que sólo se refleje la componente  $\sigma$  y se transmita la  $\pi$ .

Según la construcción del polarizador por interferencia, éste puede ser de banda estrecha o de banda ancha; en este segundo caso funciona razonablemente bien dentro un rango moderadamente amplio de longitudes de onda próximas a la nominal.

#### 4.2.7 Polarización por dispersión

Aunque no se emplea para la construcción de polarizadores, la dispersión de la luz en los medios materiales afecta a su estado de polarización y por ello es conveniente conocer este fenómeno y tenerlo en cuenta cuando se trabaja en presencia de este fenómeno.

Cuando la luz alcanza una «nube» (no necesariamente en estado gaseoso, también puede ser en un líquido o en un sólido) de partículas polarizables —o ya polarizadas— hace que las cargas eléctricas de sus átomos y moléculas «vibren» en la dirección del campo eléctrico de la onda. Estos dipolos oscilantes radian a su vez nuevas ondas luminosas que salen dispersadas sólo en aquellas direcciones en que la oscilación del campo puede propagarse como onda electromagnética, esto es, en las direcciones en que el campo eléctrico oscilante de los dipolos —y, consecuentemente, el campo de la onda incidente— tiene componente transversal.

Como el campo de una onda luminosa que alcanza una partícula está contenido en un plano perpendicular a la dirección de propagación —no tiene componente longitudinal—, cualquier onda dispersada que se propague a lo largo de una dirección contenida en dicho plano tendrá su campo eléctrico contenido a su vez en el mismo plano.

En consecuencia, la luz dispersada por una nube de partículas en dirección perpendicular a la de incidencia está polarizada linealmente y su plano de

polarización es normal a dicha dirección de incidencia.

### 4.2.8 Polarización espontánea de la luz solar

La luz solar se polariza espontáneamente tanto al reflejarse como al ser dispersada por la atmósfera.

Cuando se refleja en superficies lisas con ángulos próximos al de Brewster (en torno a  $45^\circ$  para el vidrio, el agua, muchos plásticos y otros materiales comunes) se polariza paralelamente a la superficie reflectora. Tanto para las superficies horizontales como para las verticales, esto supone que la luz reflejada especularmente tiene polarización aproximadamente horizontal.

La luz solar que la atmósfera dispersa en dirección perpendicular a aquélla de la que llegan los rayos solares queda polarizada linealmente en sentido perpendicular a dichos rayos. Así al mediodía, cuando el Sol se encuentra más o menos sobre la perpendicular a la superficie terrestre, la luz que llega del horizonte está polarizada horizontalmente; al amanecer y al atardecer, por el contrario, es la luz que llega de lo alto de la bóveda celeste la que está polarizada.

Las gafas de Sol Polaroid<sup>®</sup> aprovechan esta polarización natural de la luz solar para atenuar selectivamente los reflejos especulares molestos. Este tipo de gafas se construyen con polarizadores dicroicos con su plano de transmisión orientado *verticalmente*, de manera que permiten el paso de algo menos del 50% de la luz difusa —que permite ver los objetos— y bloquean casi completamente los reflejos polarizados horizontalmente y la luz dispersada del mediodía.

## 4.3 Birrefringencia. Retardadores

La birrefringencia es una forma de anisotropía que presentan ciertos materiales en los que la velocidad de propagación de la luz depende de cómo esté orientado el campo óptico  $\vec{E}$  con respecto a ciertas direcciones características del material. En estos materiales, la permitividad eléctrica  $\epsilon$  es diferente para cada una de las componentes linealmente polarizadas en que se puede descomponer el campo óptico y, por tanto, el índice de refracción  $n$  es también diferente para cada una de ellas.

Se llama *ejes ópticos* de un material birrefringente a aquéllas direcciones en las que la velocidad de la luz que se propaga a lo largo de ellas es independiente de su estado de polarización. Atendiendo al número de estas direcciones características, los materiales birrefringentes se clasifican en

- Uniáxicos: tienen un solo eje óptico.

- Biáxicos: tienen dos ejes ópticos.

### 4.3.1 Medios uniáxicos

Los materiales uniáxicos tienen un único eje óptico, de manera que cualquier onda luminosa que los atraviese se puede descomponer en dos ondas linealmente polarizadas con polarizaciones perpendiculares entre sí según un sistema de referencia particular

- Onda ordinaria: polarizada *perpendicularmente* al eje óptico.
- Onda extraordinaria: polarizada *no perpendicularmente* al eje óptico.

La onda ordinaria tiene asociado un índice de refracción característico  $n_O$  que además toma un valor extremo (máximo o mínimo según de qué material se trate). Cuando se refracta sigue polarizada perpendicularmente al eje óptico, su velocidad de propagación no cambia y, por lo tanto, sigue la ley de Snell que conocemos para los medios isótropos.

La onda extraordinaria, por el contrario, tiene asociado un índice de refracción  $n(\alpha)$  que depende del ángulo  $\alpha$  que forma su vector campo eléctrico con el eje óptico. Cuando se refracta cambia su orientación con respecto al eje óptico y con ello su velocidad de propagación, por ello no cumple la ley de Snell tal y como la conocemos.

El índice de refracción asociado a la onda extraordinaria crece o decrece monótonamente —según el material de que se trate— hasta alcanzar su valor extremo  $n_E$  cuando el campo óptico está polarizado *paralelamente* al eje óptico.

El grado de birrefringencia del medio se cuantifica mediante el valor de la diferencia de estos dos índices de refracción extremos, extraordinario  $n_E$  y ordinario  $n_O$ ,

$$n_E - n_O$$

Según el signo de esta cantidad, los medios uniáxicos se clasifican en

- Positivos, con birrefringencia positiva

$$n_E - n_O > 0 \Leftrightarrow n_E > n_O$$

como, por ejemplo, el cuarzo que para  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$  tiene

$$\left. \begin{array}{l} n_E = 1,5534 \\ n_O = 1,5443 \end{array} \right\} \Rightarrow n_E - n_O = +0,0091$$



- Negarivos, con birrefringencia negativa

$$n_E - n_O < 0 \Leftrightarrow n_E < n_O$$

como, por ejemplo, la calcita que para  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$  tiene

$$\left. \begin{array}{l} n_E = 1,4864 \\ n_O = 1,6584 \end{array} \right\} \Rightarrow n_E - n_O = -0,1720$$

### 4.3.2 Retardadores

Los retardadores —o desfasadores— son dispositivos ópticos que introducen un determinado desfase relativo entre las componentes del campo eléctrico de la luz que los atraviesa según dos ejes característicos. Así modifican el estado de polarización de la luz sin alterar su irradiancia.

Para construir los retardadores se cortan láminas de material birrefringente (normalmente uniaxial) paralelamente a su eje óptico y con el espesor necesario para producir el retardo deseado a la longitud de onda especificada. Los materiales más empleados en estos dispositivos son el cuarzo, la mica y algunos polímeros.

#### Ejes lento y rápido

Para poder describir los retardadores con independencia de que la birrefringencia del material con que están contruídos sea positiva o negativa, se definen para el retardador

- Eje lento: el correspondiente a la polarización de la luz que se propaga con menor velocidad, esto es, al que le corresponde el mayor índice de refracción  $n_s$  (el subíndice *s* hace referencia a *slow*, «lento» en inglés).
- Eje rápido: el de polarización de la componente de la luz que se propaga con mayor velocidad; tiene asociado el menor valor del índice de refracción  $n_f$  (el subíndice *s* hace referencia a *fast*, «rápido» en inglés).

En los medios birrefringentes positivos el eje lento es el extraordinario y en los negativos el ordinario de manera que en cualquier caso

$$n_s - n_f > 0 \Leftrightarrow n_s > n_f$$

**Retardo introducido por una lámina de espesor  $d$** 

El desfase entre las componentes del campo eléctrico en cada punto del espacio es,

$$\theta(z) = \phi_s - \phi_f + (k_s - k_f)z$$

En  $z = 0$  se tiene el desfase original entre las componentes de la onda luminosa que entra en el dispositivo

$$\theta(0) = \phi_s - \phi_f$$

y que define el estado de polarización inicial de la misma.

En  $z = d$  se tiene el desfase final, que determina el estado de polarización de la onda emergente

$$\theta(d) = \phi_s - \phi_f + (k_s - k_f)d$$

El desfase adicional introducido por la lámina retardadora es

$$\Delta\theta = \theta(d) - \theta(0)$$

$$\Delta\theta = (k_s - k_f)d$$

Si se tiene en cuenta que

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{c\omega}{vc} = nk_0 = n\frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \begin{cases} k_s = \frac{2\pi}{\lambda}n_s \\ k_f = \frac{2\pi}{\lambda}n_f \end{cases}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz en el vacío, se aprecia claramente que  $k_s - k_f > 0$  y, en consecuencia,  $\Delta\theta$  representa un retardo de la componente lenta (s) con respecto de la rápida (f). Se puede escribir, entonces

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_s - n_f)d = \frac{2\pi}{\lambda}\Lambda$$

con  $\Lambda = dn_s - dn_f$  la diferencia de camino óptico recorrido por las componentes de la onda luminosa.

Los retardadores se suelen especificar mediante el valor de la diferencia de camino óptico que introducen para una longitud de onda de trabajo determinada (o para un rango más o menos amplio de ellas), expresado en fracciones de la propia longitud de onda. Por ejemplo:

- «Retardador de  $\lambda/2$  a 633 nm»
- «Retardador de  $\lambda/4$  a 532 nm»

**Retardador de media onda  $\lambda/2$** 

Introduce un retardo angular  $\Delta\theta = \pi$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} = \pi$$

Rota el plano de polarización o los ejes de la elipse de polarización, sin cambiar su forma, hasta una posición simétrica a la inicial con respecto del eje rápido.

**Retardador de cuarto de onda  $\lambda/4$** 

Introduce un retardo angular  $\Delta\theta = \pi/2$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$$

Convierte la polarización lineal en elíptica con sus ejes principales paralelos a los del retardador, y viceversa. En el caso particular de que el plano de polarización lineal forme  $45^\circ$  con respecto a los ejes del retardador, a su salida se tiene polarización circular, y viceversa.

Si la polarización entrante es elíptica, en general, el retardador rota los ejes y cambia la excentricidad de la elipse.

## 4.4 Efectos ópticos inducidos

Existen materiales que, en condiciones normales, son isótropos pero cuando son perturbados por determinados agentes externos (fuerzas, campos eléctricos o magnéticos, etc.) adquieren un cierto grado de anisotropía y alteran el estado de polarización de la luz. También ocurre que materiales que son anisótropos en condiciones normales modifican su grado de anisotropía en presencia de agentes externos.

En ambos casos se dice que estos efectos ópticos están *inducidos* por el agente externo.

Comentaremos a continuación algunos de los efectos ópticos inducidos con mayor interés tecnológico.

### 4.4.1 Fotoelasticidad

Se trata de una birrefringencia inducida mediante tensiones mecánicas en materiales transparentes que son isótropos en condiciones normales. Algunos de

estos materiales son el vidrio, el metacrilato, la resina de epoxi, el gliptol, el poliéster y otros polímeros.

La birrefringencia ( $n_E - n_O$ ) inducida por un esfuerzo mecánico depende generalmente de la longitud de onda  $\lambda$  y tiene

- Magnitud relacionada directamente con el módulo del esfuerzo.
- Signo según el sentido del esfuerzo (tracción o compresión).
- Eje óptico según la dirección principal del esfuerzo.

Cuando un material de este tipo se sitúa entre dos polarizadores cruzados y se somete a esfuerzos mecánicos, se observa un patrón de franjas coloreadas —llamadas isocromas— que pone en evidencia la distribución de tensiones mecánicas en el interior del material.

Algunas de las aplicaciones de la fotoelasticidad son:

- El ensayo de modelos transparentes de elementos mecánicos y de estructuras mediante el estudio de las isocromas.
- Los sensores de fibra óptica polarimétricos en los que, bien una tensión mecánica transversal provocada mediante aplastamiento o por flexión, o bien otra magnitud física transformada en tensión mecánica, provoca un cambio del estado de polarización a la salida de la fibra. Del análisis de este estado de polarización se extrae el valor de la magnitud que lo ha provocado.
- La construcción de retardadores y controladores de polarización para fibra óptica. Enrollando una longitud adecuada de fibra óptica en un bucle con el radio de curvatura conveniente se consigue que la birrefringencia inducida por las tensiones internas originadas al flexar la fibra provoque, a una longitud de onda dada, un retardo de  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ , etc. La orientación de los ejes del retardador se fija girando el bucle con respecto al resto de la fibra.

#### 4.4.2 Efecto magnetoóptico de Faraday

Consiste en la rotación del plano de polarización (o de los ejes de la elipse) que experimenta la luz cuando atraviesa un medio dieléctrico al que se está aplicando un campo magnético fuerte en la dirección de propagación de la luz.

El ángulo girado es independiente del estado de polarización inicial de la luz y su sentido viene dado por el del campo magnético aplicado, no por el de

propagación de la luz; es proporcional al módulo de la inducción del campo magnético  $B$  y a la distancia  $d$  que la luz recorre en el medio

$$\beta = \mathcal{V}Bd$$

el factor de proporcionalidad  $\mathcal{V}$  recibe el nombre de constante de Verdet.

Entre las aplicaciones de este efecto podemos señalar:

- Los rotadores de polarización, que giran la polarización de la luz un determinado ángulo sin cambiar su forma ni la excentricidad de la elipse (al contrario que los retardadores de cuarto de onda).
- Los moduladores de estado de polarización (que se construyen aplicando un campo magnético variable controlado por la corriente de un solenoide) y de amplitud (situando el modulador de estado de polarización entre dos polarizadores se consigue modular la amplitud de la salida con la corriente del solenoide, aunque no linealmente ya que entra en juego la ley de Malus).
- Los aisladores ópticos de efecto Faraday, que dejan pasar la luz sólo en un sentido. Se construyen situando un rotador de efecto Faraday, ajustado para provocar una rotación de  $45^\circ$  en el plano de polarización de la luz, entre dos polarizadores girados  $45^\circ$  uno respecto del otro. Cuando la luz pasa en el sentido correcto atraviesa el primer polarizador, su plano de polarización gira  $45^\circ$  en un determinado sentido y llega al segundo polarizador alineada con su plano de transmisión de manera que lo atraviesa; cuando la luz intenta pasar en el sentido contrario pasa primero por el segundo polarizador, que la polariza a  $45^\circ$  respecto del primero, el rotador la hace girar  $45^\circ$  adicionales *en el mismo sentido que antes* (ya que éste sólo depende del sentido del campo magnético del rotador y no del sentido de propagación de la luz), de modo que cuando llega al primer polarizador ha girado  $90^\circ$  con respecto a su eje de transmisión y no es capaz de atravesarlo.

Este tipo de dispositivos se emplean, por ejemplo, para evitar que la luz reflejada en las caras de las fibras ópticas vuelva a los diodos láser, los realimente ópticamente y de lugar a inestabilidades en su funcionamiento.

#### 4.4.3 Efecto Kerr (efecto electroóptico cuadrático)

Se trata de una birrefringencia inducida en materiales normalmente isótropos mediante la aplicación de un campo eléctrico *transversal* muy intenso.

Esta birrefringencia tiene su eje óptico alineado con la dirección del campo eléctrico y su magnitud es proporcional a la longitud de onda en el vacío  $\lambda$  y al cuadrado del módulo del campo eléctrico aplicado  $E$

$$n_E - n_O = \lambda K E^2$$

el factor de proporcionalidad  $K$  se denomina constante de Kerr y puede ser positiva o negativa según de qué material se trate.

Las células de Kerr, ajustadas para actuar como retardadores de media onda cuando se aplica el campo eléctrico y situadas entre polarizadores cruzados formando respectivamente  $-45^\circ$  y  $+45^\circ$  con la dirección del campo eléctrico, se emplean como moduladores de amplitud «todo o nada» y como obturadores electroópticos de alta velocidad para fotografía o para láseres pulsantes.

#### 4.4.4 Efecto Pockels(efecto electroóptico lineal)

Es un tipo de birrefringencia adicional inducida en ciertos cristales, que ya son birrefringentes en condiciones normales, mediante un campo eléctrico en general mucho menor que el necesario para provocar el efecto Kerr. Este campo eléctrico puede ser tanto longitudinal como transversal; se habla así de

- Efecto Pockels longitudinal.
- Efecto Pockels transversal.

La birrefringencia inducida con el efecto Pockels es proporcional al campo eléctrico  $E$  que, a su vez es proporcional a la diferencia de potencial  $V$  aplicada entre los electrodos

$$n_E - n_O \propto E$$

el factor de proporcionalidad depende de las propiedades cristalinas del material y de la orientación del cristal con respecto del campo eléctrico y de la dirección de propagación de la luz.

Este comportamiento lineal y la relativamente moderada tensión de trabajo hace que este efecto sea actualmente uno de los preferidos para construir dispositivos moduladores de amplitud, fase o estado de polarización.