

Práctica 5: Polarización lineal y ángulo de Brewster

Tomás Basile, Jessica Gallegos, Rebeca Rangel

13 de agosto de 2021

Resumen

En esta práctica comprobaremos que un láser (con cualquier estado de polarización), al incidir con el ángulo de Brewster en un objeto, siempre saldrá reflejado con una polarización lineal. Para probar esto, haremos mediciones de un láser en dos puntos; en el primero manipularemos el láser de tal forma que no esté linealmente polarizado. Mientras que en el segundo punto será tras haberse reflejado con el ángulo de Brewster en un vidrio, por lo que sí estará linealmente polarizado. Comprobaremos esto midiendo la intensidad en ambos puntos y viendo que se cumple la ley de Malus en el segundo pero no el primero.

I. Introducción y Teoría

Polarización: La luz es una onda electromagnética en la que el campo eléctrico apunta en una dirección perpendicular a la dirección de propagación.^[1] Consideremos una onda que se mueve en la dirección z , entonces el campo eléctrico en un punto z a un tiempo t está en general dado por $\vec{E}(z, t) = E_x(z, t)\hat{x} + E_y(z, t)\hat{y}$. La polarización de la luz se refiere a la dirección de este campo eléctrico.

Para una onda plana armónica, estos campos eléctricos se pueden escribir en general como:^[2]

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz)$$
$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta)$$

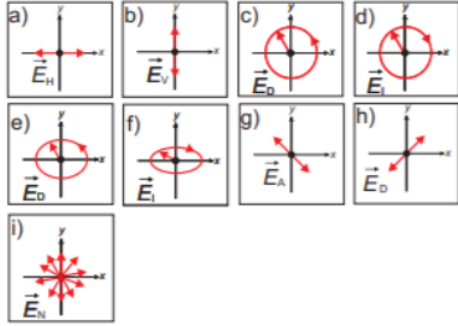


Figura 1: Estados de Polarización

Con E_{0x} y E_{0y} números reales que determinan la amplitud máxima del campo en la dirección x y y . Para una posición fija z dada, la dirección del campo eléctrico $(E_x(t), E_y(t))$ rota formando una elipse (que en el caso degenerado es simplemente una línea). Dependiendo de si se forma una elipse, un círculo o una línea y dependiendo de la dirección en la que rota el campo, se definen los estados de polarización de la figura 1.^[3]

Los tipos de polarizaciones mostradas en la figura 1 son: Polarización horizontal (E_H), vertical (E_V), circular derecha (E_D), circular izquierda (E_I), elíptica derecha (E_D), elíptica izquierda (E_I), antidiagonal (E_A), diagonal (E_D) y no polarizada (E_N).^[3] Notar que la polarización circular es sólo un caso especial de la elíptica.

La polarización de la luz se puede especificar completamente utilizando los llamados **Parámetros de Stokes**, que se definen como sigue:^[2]

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad ; \quad S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2$$
$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \quad ; \quad S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta$$

Y entonces podemos representar cualquier estado de polarización con un vector $S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$. El parámetro S_0 representa la intensidad del haz y los otros tres determinan totalmente su polarización. Si nos interesa sólo el tipo de polarización, consideramos el vector $\begin{pmatrix} S_1/S_0 \\ S_2/S_0 \\ S_3/S_0 \end{pmatrix}$, que se puede probar que tiene norma 1, por lo que se puede representar en una esfera unitaria.

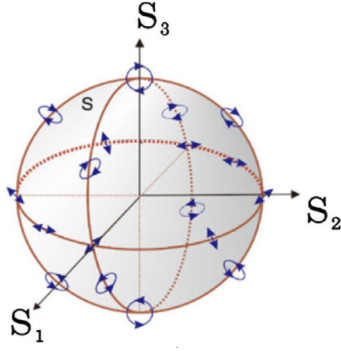


Figura 2: Algunos puntos en la esfera de Poincaré y la polarización que representan

Dicha esfera se conoce como **esfera de Poincaré**, y cualquier punto en la esfera representa los valores de $\frac{S_1}{S_0}, \frac{S_2}{S_0}, \frac{S_3}{S_0}$ y por tanto determina la polarización de la luz. Por lo que cada punto en la esfera representa una posible polarización, como se muestra en la figura 2.^[3]

La ventaja de usar los vectores de Stokes es que entonces los instrumentos ópticos se pueden representar como matrices de 4x4 que operan sobre los vectores. Al aplicar la matriz a un vector de Stokes, el vector resultante representa al haz tras pasar por el instrumento. Uno de los instrumentos más útiles y que usamos en esta práctica es la placa retardadora. Estas placas se utilizan para desfazar las componentes del campo eléctrico del haz. Este desfase tiene como efecto cambiar la polarización del haz y se puede utilizar para convertir polarizaciones lineales en elípticas.^[2]

Ley de Malus: Para esta sección es importante el concepto de polarizador lineal. Un polarizador lineal es un instrumento óptico que tiene asociado una orientación preferencial llamada **eje del polarizador**. El polarizador funciona de tal manera que si llega un haz de intensidad I_0 con polarización lineal que forma un ángulo θ respecto al eje del polarizador, entonces, tras cruzar por el polarizador, el haz pasará al otro lado con una intensidad dada por la ley de Malus:^[3]

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

La ley de Malus se cumple cuando el haz tiene una polarización lineal, si tiene una polarización elíptica, la ley no se cumplirá. De esta forma se puede definir un procedimiento para determinar si un haz está polarizado linealmente o no. Primero se hace pasar la luz por un polarizador lineal y, al ir variando el ángulo θ del polarizador, se definen I_{max} e I_{min} como las intensidades máxima y mínima del haz resultante. Posteriormente se calcula la **visibilidad** del haz:^[3]

$$\text{Visibilidad} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

La visibilidad es un número entre 0 y 1. Si la visibilidad es 1, implica que $I_{min} = 0$, lo que significa que hay una orientación del polarizador tal que la luz no lo atraviesa, demostrando que la luz tiene una polarización lineal perpendicular a dicha orientación. Mientras que una visibilidad menor que 1 implica que $I_{min} > 0$, por lo que parte del haz siempre atraviesa el polarizador, mostrando que no está polarizado linealmente. En conclusión, una visibilidad de 1 demuestra que la luz está polarizada linealmente.

Ángulo de Brewster: Un fenómeno importante de la óptica física es estudiar lo que sucede en la reflexión cuando un haz en un medio incide sobre otro medio. El campo eléctrico tiene una componente paralela y una perpendicular al plano de incidencia determinadas por su polarización; por lo cual, la parte de la energía reflejada se divide en una parte paralela R_{\parallel} y una perpendicular R_{\perp} . De las ecuaciones de Fresnel se llega a que:^[3]

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad ; \quad R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

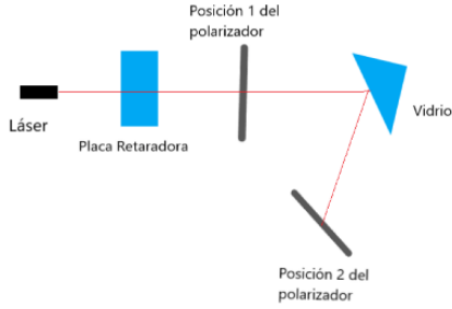
Donde θ_i es el ángulo de incidencia y θ_t el de transmisión, que se puede calcular usando los índices de refracción y la ley de Snell. Cuando el haz se refleja, la intensidad paralela al plano de incidencia se ve multiplicada por R_{\parallel} y la parte perpendicular se ve multiplicada por R_{\perp} .

Se puede comprobar que hay un ángulo de incidencia θ_B (llamado ángulo de Brewster) en el que $R_{\parallel} = 0$, lo que significa que si la luz llega con dicho ángulo a la superficie, la parte reflejada estará totalmente polarizada en la dirección perpendicular al plano de incidencia. Usando la ley de Fresnel y la expresión de R_{\parallel} , se puede probar que dicho ángulo es:^[3]

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

II. Experimento y Resultados

Montaje:



Como se muestra en la figura 3, para el montaje del experimento tomamos un haz láser (He-Ne, con longitud de onda de 632.8 nm) y lo apuntamos a una placa retardadora de 0.31λ , (lo que hace esta placa es cambiar la polarización lineal que tiene en general un láser a una polarización elíptica). Posteriormente lo hacemos incidir en un vidrio BK7, de forma que llegue con el ángulo de Brewster (56.06° para el vidrio utilizado).

Figura 3: Montaje Experimental

El experimento se divide en dos partes, en la primera se puso un polarizador en la posición 1 marcada en la figura (antes del vidrio) y en la segunda parte lo colocamos en la posición 2 (tras haber sido reflejado por el vidrio).

Experimento: Parte 1 : Colocamos un polarizador en la posición 1 mostrada en el montaje experimental y un detector inmediatamente después. Se fue variando el ángulo θ del polarizador y se midió la intensidad del láser para cada ángulo. En la figura 4 se muestran los resultados de la intensidad vs el ángulo del polarizador en la posición 1.

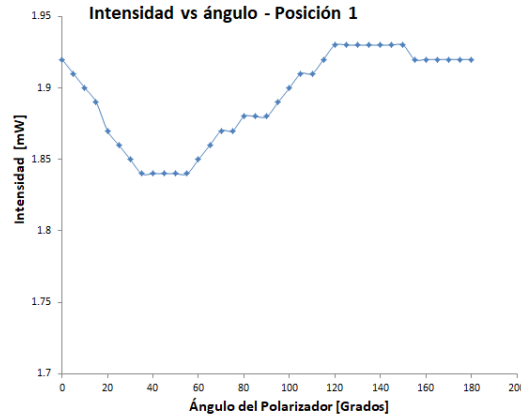


Figura 4: Gráfica de intensidad vs ángulo - Posición 1

Podemos ver que la intensidad máxima es de 1.93 mW y la mínima es de 1.84 mW. Ahora bien, usando la ecuación (1) de la teoría tenemos que la visibilidad es de: $V_1 = \frac{1,93 - 1,84}{1,93 + 1,84} = 0,023$.

Parte 2 : Para esta parte sacamos el polarizador de la posición 1, lo colocamos en la posición 2 y colocamos el detector inmediatamente después del polarizador. Al igual que antes, se fue variando el ángulo θ del polarizador y se midió la intensidad del láser para cada ángulo. En la figura 5 se muestran los resultados.

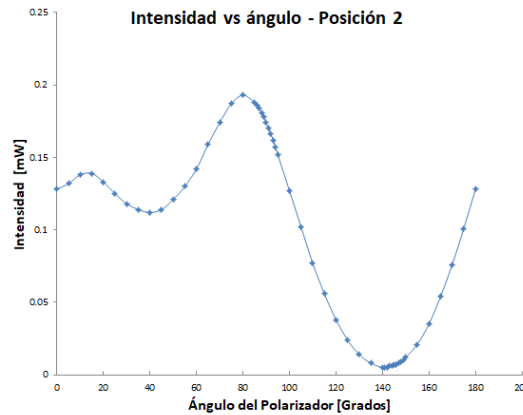


Figura 5: Gráfica de intensidad vs ángulo - Posición 2

Ahora podemos ver que la intensidad máxima es de 0.193 mW y la mínima es de 0.005 mW. Y usando nuevamente la ecuación (1), tenemos que la visibilidad es de $V_2 = \frac{0,193 - 0,005}{0,193 + 0,005} = 0,95$.

III. Conclusiones

Viendo los resultados podemos comprobar lo que se mencionó en el marco teórico. En la primera parte, tenemos que el láser pasa por la placa retardadora (lo cual cambia su polarización lineal a una elíptica), esto explica que no se siga la ley de Malus al colocar el polarizador y que no haya un ángulo del polarizador tal que la intensidad sea 0. Así mismo, en la teoría vimos que si la visibilidad era cercana a 1, teníamos una polarización lineal, por lo que al tener la visibilidad $V_1 = 0,023$, podemos reafirmar que no hay una polarización lineal.

Ahora bien, en la segunda parte, cuando el haz se refleja con el ángulo de Brewster en el vidrio, termina polarizado linealmente en la dirección perpendicular al plano de incidencia. Esto lo pudimos comprobar en los resultados al observar que en la figura 5 se sigue la ley de Malus al colocar el polarizador y que hay una orientación del polarizador tal que la intensidad se anula. De igual manera, al obtener $V_2 = 0,95$ cercano a 1, podemos reafirmar que hay una polarización lineal.

Por lo tanto, podemos concluir que un láser con polarización no lineal, al incidir en un vidrio con el ángulo de Brewster, sale reflejado con una polarización lineal.

IV. Referencia

- [1] Hecht Eugene, Optics, Fifth Edition, Pearson, USA,2017.
- [2] Collett Edward, Field Guide to Polarization, First Edition, SPIE Press, USA,2015.
- [3] Ramírez, H. C. (2017). *Polarización I : Polarización lineal y ángulo de Brewster*. Recuperado 12 de Agosto de 2021 de [http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5268/Polarizacion I.pdf](http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5268/Polarizacion%20I.pdf)
- [4] Ramírez, H. C. (2017). *Polarización II : medición de los parámetros de polarización de Stokes*. Recuperado 12 de Agosto de 2021 de [http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5268/2018-10-16-171919 Polarizacion II.pdf](http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5268/2018-10-16-171919%20Polarizacion%20II.pdf)