



GRADO EN FÍSICA

LABORATORIO DE FÍSICA III

CURSO 2015-2016 1^{er} CUATRIMESTRE

LABORATORIO DE ÓPTICA

PRÁCTICA: Transmisión en polarizadores y reflexión de la luz en intercaras

PRECAUCIÓN: En esta práctica se emplea una fuente de luz láser. **No se debe mirar directamente a la fuente de luz o a cualquier reflejo de la misma [1].**

Importante. Conviene encender el láser al principio de la práctica y no apagarlo hasta que no se vaya a abandonar el laboratorio.

1. Objetivos:

- Ley de Malus para un polarizador real. Medida de los factores k_1 y k_2 .
- Determinación de los ejes de transmisión de un polarizador lineal.
- Medida del índice de refracción de un dieléctrico y determinación del ángulo de Brewster.
- Análisis cualitativo de la reflexión en una superficie metálica.

2. Fundamentos físicos:

En esta práctica se estudiará la transmisión de la luz en polarizadores y la reflexión de la luz en superficies dieléctricas y metálicas. Una introducción básica a todo lo relacionado con la polarización de la luz puede encontrarse en numerosos libros de texto (Capítulo 8 de la Ref. [2], por ejemplo).

2.1 Polarizadores.

A los sistemas que solo permiten que se transmita el campo eléctrico que vibra de una manera determinada se les denomina polarizadores. El caso más sencillo es el de los polarizadores lineales, que solo permiten que les atraviese la parte de la luz cuyo campo eléctrico está vibrando en una determinada dirección denominada eje de transmisión o eje del polarizador.

Si suponemos que sobre un polarizador lineal ideal incide luz linealmente polarizada cuyo campo forma un ángulo φ con el eje del polarizador, a la salida la onda resultante tendrá una amplitud igual a la proyección de la amplitud inicial del campo sobre el eje del polarizador, lo que nos da un factor $\cos \varphi$. Como además la potencia P de luz transmitida va con el cuadrado del campo eléctrico, a la salida de un polarizador lineal ideal tendremos

$$P(\varphi) = P_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

donde P_0 es la potencia de la luz a la entrada. Esta expresión se conoce como **Ley de Malus** [2]. En los polarizadores reales no se transmite todo el campo que vibra en la dirección de su eje y se transmite parte del campo que vibra en la dirección perpendicular, por lo que para un polarizador real la ley de Malus será de la forma [3]

$$P(\varphi) = P_0(k_1 \cos^2 \varphi + k_2 \sin^2 \varphi) = P_0(k_1 - k_2) \cos^2 \varphi + P_0 k_2, \quad (2)$$

donde k_1 y k_2 son los parámetros que describen la máxima y la mínima transmisión del polarizador, respectivamente.

2.2 Reflexión en intercaras.

Cuando una onda electromagnética propagándose en un medio de índice de refracción n incide sobre un medio de índice de refracción $n' \neq n$ parte de la luz se transmite y parte de la luz se refleja. Si la onda es plana y está linealmente polarizada tendremos una situación como la mostrada en la Fig. 1(a), en la que la onda llega con ángulo de incidencia θ y un azimut α (el azimut es el ángulo que forma el plano de polarización de la onda con el plano de incidencia, que a su vez se define como el plano que contiene la dirección del haz incidente y la normal a la superficie). En ese caso el ángulo de incidencia y el de refracción, θ' , están relacionados por la ley de Snell, $n \sin \theta = n' \sin \theta'$, y la relación entre la amplitud de los campos incidente A y reflejado R vienen dadas por las fórmulas de Fresnel [4-7]:

$$R_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}(\theta - \theta')}{\operatorname{tg}(\theta + \theta')} A_{\parallel}, \quad (3)$$

$$R_{\perp} = -\frac{\sin(\theta - \theta')}{\sin(\theta + \theta')} A_{\perp}, \quad (4)$$

donde los subíndices \parallel y \perp hacen referencia a las componentes del campo paralelo y perpendicular al plano de incidencia. Nótese que en la práctica no mediremos las amplitudes de los campos, sino la potencia de luz detectada, que es proporcional al cuadrado de las amplitudes.

Si los dos medios son dieléctricos, es decir medios no absorbentes con índices de refracción reales (por ejemplo, vidrios, plásticos, etc.), los ángulos θ y θ' son reales, y las funciones trigonométricas de las ecuaciones (3)-(4) también lo son. Es decir, no habrá un desfase relativo entre las componentes del campo, por lo que **si el haz incidente está linealmente polarizado también lo estará el reflejado**. Teniendo en cuenta que los azimuts de los haces incidente y reflejado vienen dados por $\operatorname{tg} \alpha = A_{\perp}/A_{\parallel}$ y por $\operatorname{tg} \alpha_r = R_{\perp}/R_{\parallel}$, de las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$\operatorname{tg} \alpha_r = -\frac{\cos(\theta - \theta')}{\cos(\theta + \theta')} \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

que relaciona el azimut de la luz reflejada con el de la incidente y el ángulo θ . Para este tipo de medios existe un ángulo de incidencia llamado ángulo de Brewster, θ_B , para el cual $\theta_B + \theta' = \pi/2$. En esta situación se hace infinito el denominador de la ecuación (3), por lo que se anula la componente R_{\parallel} . La luz reflejada estará linealmente polarizada perpendicular al plano de incidencia, independientemente del estado de polarización del haz incidente. Lo mismo puede verse a través de la ecuación (5), donde si $\theta_B + \theta' = \pi/2$ el denominador

se anula y $\alpha_r = \pi/2$ independientemente de α . Teniendo en cuenta $\theta_B + \theta' = \pi/2$ y la ley de Snell, es fácil llegar a la expresión que relaciona θ_B con los índices de refracción de los dos medios:

$$\text{tg}\theta_B = \frac{n'}{n}. \quad (6)$$

En la Fig. 1(b) se representa esquemáticamente los campos reflejados para $\theta = \theta_B$. En la Fig. 2(a) se muestra la dependencia de las componentes reflejadas del campo con el ángulo de incidencia para una reflexión en la frontera aire–dieléctrico. Se observa que la componente perpendicular no se anula para ningún ángulo, mientras que la componente paralela se anula justamente en el ángulo de Brewster.

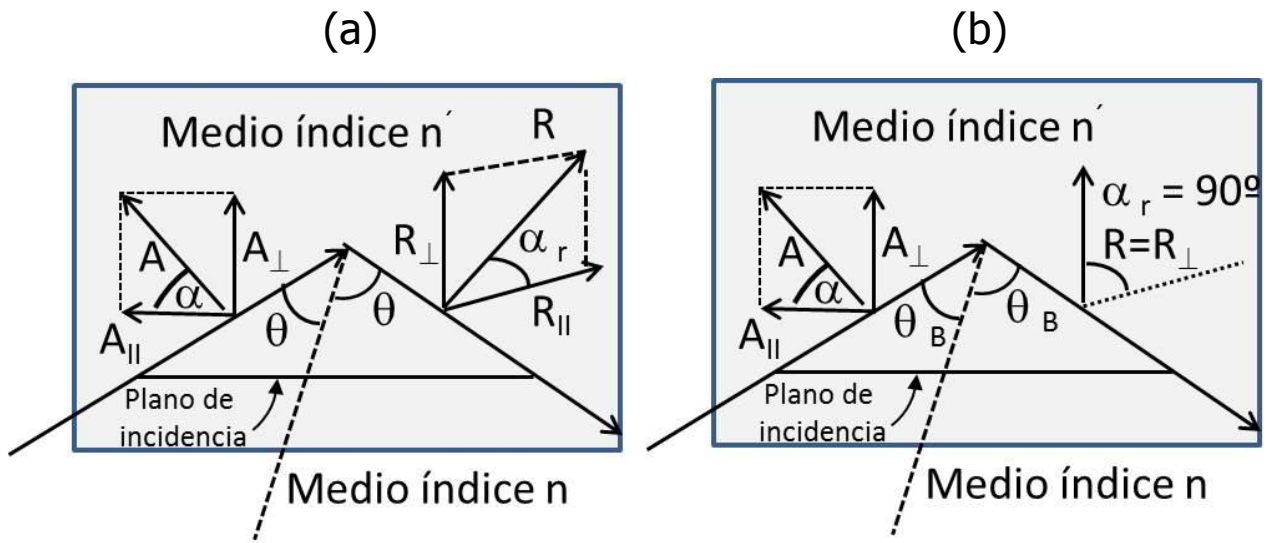


Figura 1. Amplitud del campo incidente y reflejado y sus respectivos azimuts, α y α_r para incidencia con un ángulo arbitrario θ (a) y con el ángulo de Brewster θ_B (b). En el caso (b) el haz reflejado está linealmente polarizado con componente perpendicular al plano de incidencia.

Si la reflexión se produce en la interfase dieléctrico-metal, las ecuaciones (3) y (4) siguen siendo válidas, pero como el índice de refracción del metal n' es complejo al aplicar la ley de Snell aparece un valor complejo para el ángulo θ' . Como consecuencia los campos eléctricos dados por las ecuaciones (3) y (4), también son complejos, y se pueden expresar como un módulo (amplitud del campo) y una exponencial compleja que lleva la información de la fase del campo. Así, tras la reflexión en un metal, las componentes del campo se ven afectadas de una fase que no tiene que ser coincidente. Es decir, aparece un desfase relativo entre componentes, por lo que el estado de polarización de la luz cambia. Si se incide con luz linealmente polarizada sobre un metal, tras la reflexión el campo tendrá en general polarización elíptica. Notar que hay dos casos particulares, incidencia con luz linealmente polarizada contenida en el plano de incidencia y perpendicular al mismo, en el que el estado de polarización tras la reflexión se mantiene inalterado. Esto sucede porque ya no hay desfase relativo entre las componentes del campo puesto que éste solo tiene una componente. Además para el caso de **reflexión en metales no existe un ángulo que anule el denominador de la ecuación (1)**, pero si existe un mínimo en la reflexión de la componente paralela. A ese ángulo, por analogía con el caso

dieléctrico-dieléctrico, se le denomina ángulo de Brewster para metales. En la Fig. 2(b) se muestran las componentes del campo reflejado en la interfase aire-metal en función del ángulo de incidencia.

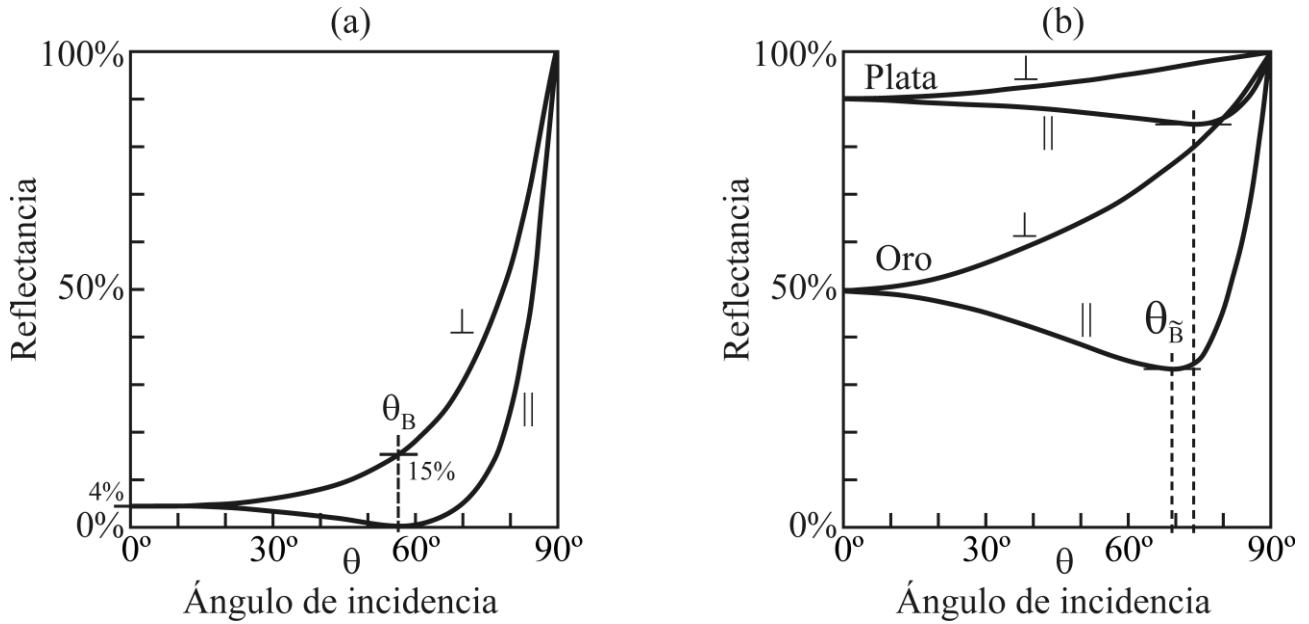


Figura 2. Reflectividad (potencia del haz reflejado/potencia del haz incidente) en función de θ para luz incidente con componentes paralela \parallel y perpendicular \perp al plano de incidencia: a) reflexión aire-dieléctrico (vidrio $n = 1,5$); b) aire-metal (oro y plata).

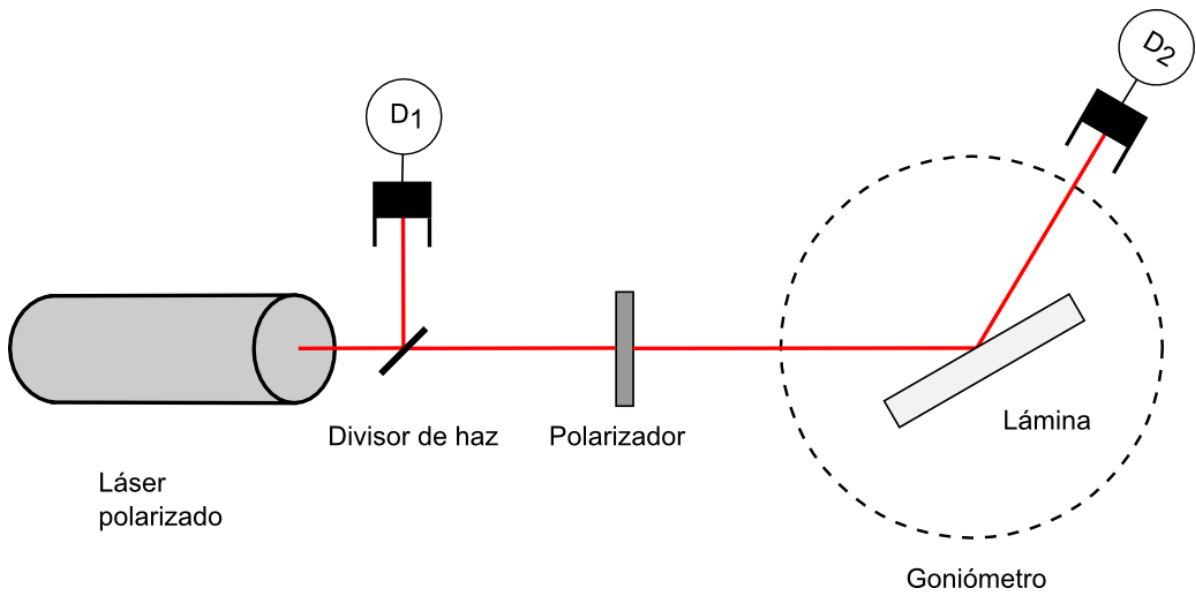


Figura 3. Montaje experimental empleado para medir los factores k_1 y k_2 de un polarizador y la reflexión en una lámina.

3. Método experimental:

Para realizar esta práctica emplearemos un montaje como el que se muestra en la Fig. 3. Un láser de HeNe linealmente polarizado pasa a través de un divisor de haz y un polarizador para incidir sobre la superficie de una lámina situada en la parte central de un goniómetro. La potencia de la luz reflejada por el divisor de haz y por la lámina se miden con los fotodetectores D_1 y D_2 , respectivamente. El detector D_2 está acoplado al

brazo móvil. La lámina puede girarse de forma graduada con el goniómetro de forma que se puede cambiar el ángulo de incidencia θ y ajustar el brazo móvil para que la reflexión incida sobre el detector D_2 . En la primera parte de la práctica (Punto 3.1) utilizaremos el montaje experimental sin la lámina, mientras que en la segunda parte (Punto 3.2) utilizaremos el montaje experimental completo. Conviene hacer varias consideraciones sobre este montaje: un láser de HeNe polarizado es una buena fuente de luz para hacer las medias de esta práctica y en principio bastaría con un único detector. Sin embargo la potencia que emite este tipo de fuentes fluctúa, por lo que para poder usar las fórmulas (1) y (2) conviene hacer dos medidas simultáneas: una a la salida del láser, D_1 , y otra a la salida del montaje, D_2 , sustituyendo las potencias por el cociente D_2 entre D_1 en todas las fórmulas ($P \rightarrow D_2/D_1$). Así, aunque D_1 (la cantidad de luz que emite el láser) no sea estable, como D_2 variará en la misma proporción, al usar el cociente de esas dos cantidades desaparece el factor de variación. **A lo largo de toda la práctica se medirá D_1 y D_2 para determinar la potencia ($P \rightarrow D_2/D_1$) libre de fluctuaciones.**

3.1 Medida de los factores k_1 y k_2 de un polarizador dicróico real.

Para esta parte de la práctica usaremos el montaje de la Fig. 3 sin la lámina y con el brazo del detector D_2 alineado con el haz incidente. Idee un método experimental para determinar los valores k_1 y k_2 haciendo el menor número de medidas posibles. Para ello utilice la fórmula (2) con los ángulos φ apropiados.

3.2 Medida de las reflectividades $R_{\parallel}^2/A_{\parallel}^2$ y R_{\perp}^2/A_{\perp}^2 para una lámina dieléctrica.

El objetivo de esta parte de la práctica es obtener la curva de reflectividad en una lámina dieléctrica para las polarizaciones \parallel y \perp en función del ángulo de incidencia, de forma similar a la gráfica de la Fig. 2 (a). Para ello usaremos el montaje de la Fig. 3 completo, que nos permite variar θ y la polarización del haz incidente. Notar que el plano de incidencia es el plano de la mesa (ver Fig. 1). El haz láser está linealmente polarizado con azimut 45° (aproximadamente), por lo que con un polarizador situado antes de la lámina dieléctrica puede seleccionar luz polarizada \parallel ó \perp . Medite la forma de obtener estas dos polarizaciones. Para ello determine la dirección de transmisión del polarizador con respecto al plano de incidencia. ¿Se le ocurre algún modo de averiguarlo? Si lo considera oportuno puede sacar el polarizador del montaje y utilizar fuentes de luz despolarizadas, como por ejemplo la luz del flexo.

Una vez seleccionada la polarización del haz incidente idee un método para medir la potencia de la luz reflejada en función de θ . Para ello debe encontrar la relación que hay entre la medida angular obtenida con el goniómetro y el ángulo θ . En incidencia \perp razone y explique qué valor de la potencia debemos buscar para poder obtener θ_B , y a partir de éste determine el índice de refracción del medio. A continuación haga un ajuste de la potencia relativa de la luz \perp en torno al ángulo de Brewster utilizando una parábola del tipo $P(\theta) = A(\theta - \theta_B)^2$ o directamente con la ecuación (3). Determine θ_B y el índice de refracción de la lámina y compárelo con los resultados anteriores.

En incidencia \parallel represente y ajuste a la ecuación (4) las medidas experimentales de la potencia reflejada alrededor del ángulo de Brewster y compare con los resultados al incidir con \perp .

3.3 Ángulo de Brewster para metales.

Se sustituirá la lámina dieléctrica por una lámina metálica y se comprobará que no hay una extinción tan clara de ninguna de las componentes, como se ve en la Fig. 2 (b). Se representará gráficamente la potencia relativa en función del ángulo de incidencia para las dos polarizaciones. Se analizará y comentará el resultado obtenido en términos comparativos con lo que se obtenía para la lámina dieléctrica.

4. Bibliografía

- [1] [Radiaciones ópticas artificiales. Factores relacionados con la fuente y las medidas de control](#). IDEARA SL, Instituto Regional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2013).
- [2] E. Hecht, [Óptica](#), (Addison-Wesley Iberoamericana, Madrid, 1999): capítulo 8.
- [3] [IDEX Optics & Photonics Technical Guide](#), pg. A139 ([Fundamental Optics](#), CVI Melles Griot 2009 Technical Guide, Vol 2, Issue 1, pg 1.43).
- [4] J. M. Cabrera, F. J. López y F. Agulló López, *Óptica electromagnética* (Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, EE.UU., 1998): páginas 259-279.
- [5] J. Casas, *Óptica* (Librería Pons, Universidad de Zaragoza, 1994): páginas 189-204.
- [6] A. Jenkins y H. E. White, *Fundamentos de óptica* (McGraw-Hill, New York, EE.UU., 1964): páginas 531-552.
- [7] E. Hecht, [Óptica](#), (Addison-Wesley Iberoamericana, Madrid, 1999): páginas 113-123.
- [8] J. Torrent, [Detección de películas nanométricas por microscopía de ángulo de Brewster](#).

Plantilla

El informe de esta práctica debe contener única y exclusivamente las respuestas solicitadas en esta plantilla. En esta plantilla no debe calcular las incertidumbres de los resultados

- Explique claramente la ventaja de utilizar dos fotodetectores, y por tanto trabajar con medidas relativas en lugar de absolutas.

Medida de los factores k_1 y k_2 de un polarizador dicróico real.

- Especifique clara y brevemente el procedimiento experimental empleado para determinar los factores k_1 y k_2 del polarizador empleado en la práctica.

Medida del índice de refracción de un dieléctrico y determinación del ángulo de Brewster

- Especifique clara y brevemente los dos procedimientos experimentales empleados para determinar el ángulo de Brewster y el índice de refracción de la lámina dieléctrica de índice desconocido.
- Exponga los resultados de todas las medidas realizadas. Represente gráficamente la potencia relativa en función del ángulo de incidencia para las componentes paralela y perpendicular y sus ajustes correspondientes.
- Dé los valores del ángulo de Brewster y el índice de refracción de la lámina dieléctrica obtenidos mediante los dos procedimientos empleados.
- Compare los dos métodos razonando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Reflexión en una superficie metálica

- Repita las medidas realizadas en el apartado anterior sustituyendo la lámina dieléctrica por la metálica. Haga una observación rápida de si al igual que en el caso anterior existe algún ángulo de incidencia con reflectividad nula (o casi nula).
- Exponga los resultados de todas las medidas realizadas. Represente gráficamente la potencia relativa en función del ángulo de incidencia para las componentes paralela y perpendicular.
- Describa comparativamente los resultados obtenidos para el medio dieléctrico y la lámina metálica.

Debe añadir aquí algo que haya observado o ideado y que no esté incluido en lo anterior.

5. Quiero saber más

Polarizadores

Los polarizadores y las láminas desfasadoras se utilizan en muchos laboratorios de investigación, pero también en muchos sistemas industriales e incluso en la vida cotidiana. Basta considerar las pantallas de cristal líquido para darse cuenta de que se trata de dispositivos omnipresentes. Sin ánimo de ser exhaustivos algunos detalles de éste y otros ejemplos de luz polarizada en la naturaleza y en la tecnología pueden encontrarse en www.polarization.com.

En caso de estar interesado en la vida de Etienne Louis Malus se puede consultar el siguiente artículo:

Etienne Louis Malus. Bob Guenther, Optics and Photonics News, Vol. 10, Issue 7, pp. 24- (1999). www.osa-opn.org/opn/media/Images/PDFs/12844_25991_113304.pdf?ext=.pdf

Ángulo de Brewster

El nombre de ángulo de Brewster, también conocido como de polarización máxima, debe su nombre al científico británico David Brewster (1781-1868) que realizó investigaciones relevantes sobre polarización de la luz entre otras cosas, además de ser el inventor del caleidoscopio o endoscopio. Enunció la denominada *ley de Brewster* en el año 1815.

Existen multitud de experimentos que usan el ángulo de Brewster con diferentes aplicaciones. Una de las más conocidas, tal y cómo se ha visto en el apartado 3.2 es la determinación del índice de refracción de un dieléctrico.

Microscopia de ángulo de Brewster para la detección de películas nanométricas

La microscopia de ángulo de Brewster (BAM) es una técnica óptica que permite la observación y detección de películas a partir de unos pocos nanómetros de grosor [8], siendo muy útil para caracterizar películas orgánicas sobre agua o un medio acuoso, como es el caso de los lípidos y otros compuestos especialmente anfifílicos, y que por extensión puede aplicarse a la capa lipídica de la película lagrimal.

Si sobre el substrato se encuentra una película delgada con un índice de refracción distinto del substrato, entonces no se cumple la condición del ángulo de Brewster, ni en la interfaz aire/película ni en la interfaz película/substrato. Sin embargo, algunas reflexiones ocurren en ambas interfaces, y también puede haber reflexiones múltiples en la película. Todas estas reflexiones se superponen coherentemente y producen una señal que puede ser detectada con un sensor (por ejemplo, con una cámara CCD). La potencia reflejada depende del espesor de la película y de sus parámetros ópticos. En el caso de una típica monocapa orgánica sobre agua (espesor 2 nm) la potencia reflejada es del orden de una millonésima parte de la potencia incidente. Esto no es mucho pero es aún suficiente para producir, mediante un objetivo de microscopio, imágenes bien contrastadas y con una buena resolución espacial.

El sistema BAM debe ser visto sobretodo como un microscopio, puesto que su sistema de formación de imágenes se realiza a través de un objetivo de microscopio sobre una cámara CCD. Lo diferente respecto a los microscopios convencionales es que la iluminación se realiza con un ángulo de incidencia de aproximadamente 53° y la observación y la captura de imágenes con una inclinación también de aproximadamente 53° para captar la luz reflejada especularmente en la muestra.

El BAM utiliza el principio del ángulo de Brewster aire/agua como sistema de mejora del contraste en las imágenes, lo que da lugar a buenos contrastes en capas muy delgadas, incluso cuando estas capas son monomoleculares, lo que le convierte en un instrumento de muy alta sensibilidad para obtener imágenes de películas muy delgadas y estructuras superficiales que se formen sobre materiales dieléctricos transparentes, sobre todo los que se forman sobre la superficie del agua. Ello permite además obtener información cuantitativa de las imágenes (por ejemplo, la distribución del tamaño de los dominios) con una resolución lateral de hasta una micra, dependiendo del objetivo de microscopio utilizado.

Otras aplicaciones de uso habitual

En la imagen siguiente se muestra la imagen reflejada de unas lentes de plástico que son iluminadas mediante luz polarizada (procedente de un monitor de ordenador). La cámara está cercana al ángulo de Brewster, lo que hace sea sensible a los desfases que sufre la luz producidos por la tensión de la montura. Inducen un cambio en la birrefringencia del medio, provocando el patrón coloreado (http://www.osa-opn.org/home/gallery/photo_contests/2008/gallery08_1.jpg/).

A causa de la polarización de la luz reflejada, las gafas de sol hechas de material polarizador son eficaces para reducir el deslumbramiento. Si la luz es reflejada por una superficie aproximadamente horizontal el campo eléctrico de la luz reflejada es mayormente horizontal, por lo que unas gafas de sol polarizadas con sus ejes verticales ayudan a disminuir la luz reflejada, y por tanto mejoran la visión de determinados objetos. Esto es útil, por ejemplo en la pesca deportiva, tal y como se aprecia en el vídeo siguiente:

<http://www.youtube.com/watch?v=6eKbYVs6x-k>.

Es habitual en los láseres de gas poner las ventanas del tubo en ángulo de Brewster respecto al eje óptico para conseguir que no haya pérdidas por reflexión en dichas ventanas (<http://www.um.es/leq/laser/Ch-7/F7s5t1p6.htm>).