

DIFFUSE REFLECTION ON PARALLEL PLATES

REFLEXION DIFUSA SOBRE LAMINAS DE
CARAS PLANO-PARALELAS

M. DELGADO* y E. BERNABEU

Departamento de Optica. Universidad Complutense de Madrid.

Facultad de Ciencias Físicas. Ciudad Universitaria.

28040 Madrid (España).

** I.B. Juan Carlos I. Ciempozuelos. Madrid (España).*

ABSTRACT

In this work treated comprehensively a method for simultaneous determination of the parameters: refractive index and thickness of plane-parallel plate, dielectric, homogeneous, and isotropic, have been made by means of diffuse light of laser beam.

RESUMEN

Se presenta un método sencillo para la determinación simultánea de los parámetros: índice de refracción y espesor de una lámina plano-paralela dieléctrica, homogénea e isotrópica, a partir de la observación de los fenómenos que se manifiestan en la luz difusa, proviniendo de un haz láser.

1. INTRODUCCION

Una superficie física de separación entre dos medios en interacción con una radiación luminosa, no es estrictamente una discontinuidad matemática pura pero a menudo es conveniente debido a la complejidad de los problemas que plantea, tratarla como tal. De esta manera se obtienen formulaciones simples, con grados de aproximación suficientemente satisfactorios como para dar cuenta del fenómeno físico estudiado. Así las fórmulas de Fresnel, obtenidas para una intercara plana que separa dos medios dieléctricos de distinto índice de refracción, no hacen ningún tipo de hipótesis sobre ella idealizando ésta y obteniendo resultados teóricos cuya aplicación física es correcta para el grado de aproximación que habitualmente manejamos.

Un fenómeno que permite ilustrar lo anterior es la reflexión difusa que experimenta la luz visible cuando incide sobre las superficies de una lámina de caras plano-paralelas en un dieléctrico transparente, una de las cuales presenta un grado de lisura menor que la otra, debido a que sobre ella se ha producido artificialmente

una cierta rugosidad. Un trabajo reciente (1) señala un método para determinar el espesor o el índice de refracción de una lámina planoparalela de luz difundida en una cara rugosa. Nuestro propósito ha sido poder caracterizar conjuntamente ambos parámetros con un análisis más detenido de los fenómenos de luz difusa.

2. DESCRIPCION EXPERIMENTAL

Para la experimentación y por facilidad práctica hemos utilizado una lámina comercial de metil-metacrilato sobre la que hemos producido en una de sus caras una rugosidad artificial por abrasión mecánica. La lámina la caracterizamos por un espesor d y un índice de refracción n . Hemos hecho incidir normalmente, y después bajo un ángulo α , un haz láser de He-Ne de 2 mW no polarizado, de tal manera que la lámina de caras plano-paralelas ofrece al haz, en primer lugar, la superficie más pulimentada, según el esquema que aparece en la Figura 1, observando los siguientes fenómenos:

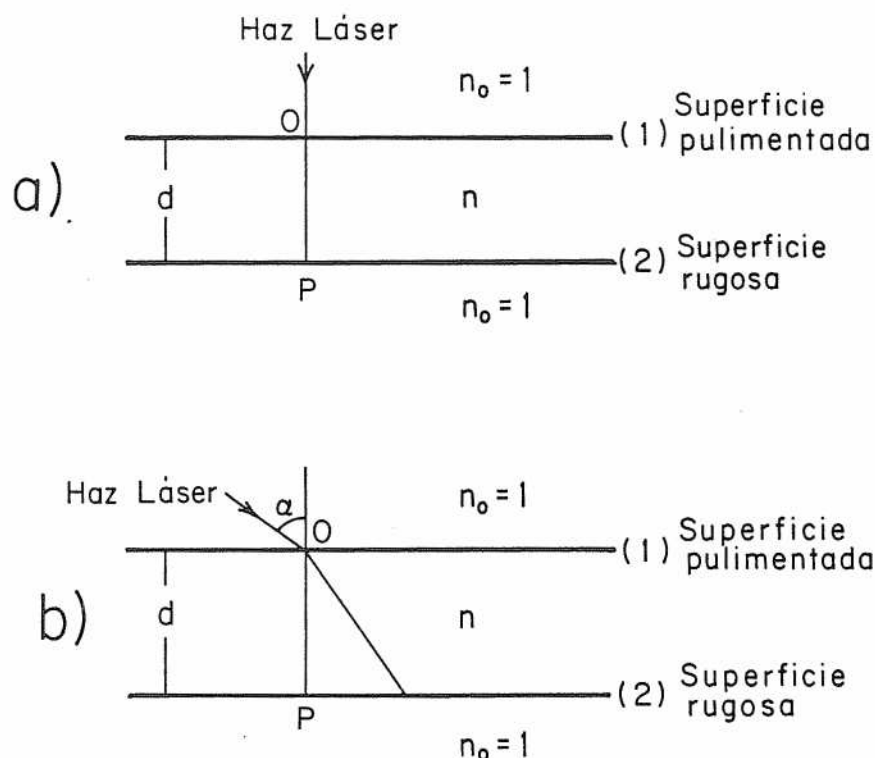


Fig. 1.— Esquema de la disposición experimental.

a) en incidencia normal; b) en incidencia oblicua de ángulo α .

a) El punto donde incide el haz láser, aparece rodeado de un círculo oscuro.

b) Si desplazamos la lámina paralelamente de tal manera que la distancia a la fuente láser no varíe, aparecen una serie de círculos brillantes, nítidos y bien definidos para determinadas posiciones. Así pues, el círculo oscuro se convierte en una corona circular.

c) La aparición del círculo central brillante, es independiente de la distancia a la fuente láser, pero es conveniente su utilización a pequeñas distancias (15 ó 20 cm.) para evitar efectos indeseables de divergencia del haz.

d) Los círculos anteriormente citados aparecen y desaparecen con el movimiento paralelo de la lámina, no habiendo encontrado ninguna regularidad en su aparición, por lo que se forman de manera aleatoria, (téngase en cuenta que la rugosidad que tiene la lámina está distribuída al azar, por la manera de generarla).

e) Cuando la lámina gira, de tal manera que la normal a ella forma un cierto ángulo α con la dirección del haz láser, el círculo oscuro no varía su radio, sin

embargo, a medida que dicho ángulo va teniendo un valor más elevado, el círculo central brillante va desplazándose desde el centro hacia uno de los lados.

f) Si el ángulo α sigue creciendo, todos los efectos descritos anteriormente se siguen manteniendo y los círculos brillante y oscuro llegan a hacerse tangentes.

g) En incidencia rasante, aparecen una serie de círculos brillantes sucesivos y superpuestos en parte. Asimismo, el círculo oscuro se deforma, apareciendo círculos oscuros de menor intensidad. El punto central luminoso perteneciente al haz láser directo se convierte en un segmento luminoso, en el que se distingue la zona central como aquella que tiene mayor intensidad. Cada uno de los puntos de este segmento, son generadores de los sucesivos círculos brillantes que se acompañan de la deformación del círculo más oscuro y se observa un sistema de anillos difusos alternativamente claros y oscuros que rodean a los descritos.

Estos fenómenos pueden observarse en la fotografía que se muestra en la Figura 2.

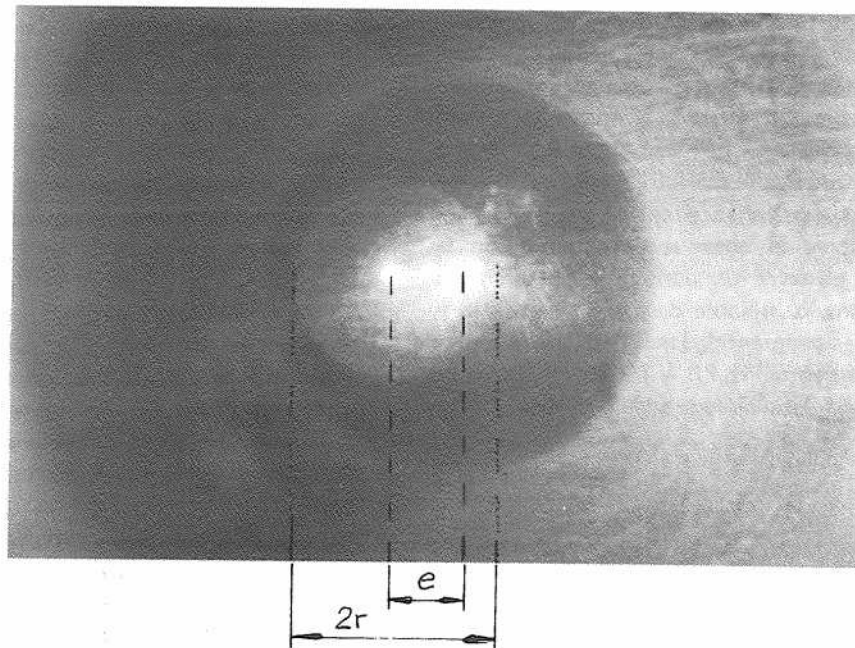


Fig. 2.— Desplazamiento del círculo central y puntos de entrada y emergencia del haz.

3. INTERPRETACION FISICA

Supongamos que el haz láser es perpendicular a las superficies que forman la lámina de caras plano-paralelas, tal como muestra la Figura 3. Como la segunda superficie es rugosa el haz luminoso sufre una reflexión difusa en el punto P. Los haces de luz se transmiten y se reflejan bajo ángulos comprendidos entre 0 y $\pi/2$. Sin embargo aquellos que tienen reflexión bajo ángulos inferiores al ángulo crítico ϕ_{cr} , subtienden

alrededor del punto O un cono cuyo diámetro angular sobre la primera superficie es $2\phi_{cr}$. Estos haces experimentan refracción y reflexión sobre la primera superficie por lo que hay luz transmitida, que puede ser observada por transmisión bajo un círculo de radio $ON=OM$.

Por otra parte los haces luminosos que en el punto P son reflejados bajo ángulos $\phi > \phi_{cr}$, experimentan un fenómeno de reflexión total, por lo que la zona RS forma un anillo de débil intensidad luminosa, debido a los haces reflejados en la zona MN.

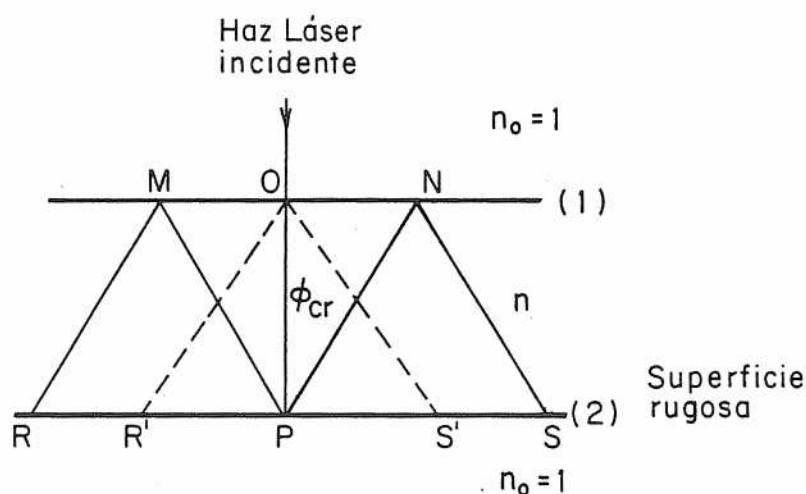


Fig. 3.— Esquema del trazado geométrico de los haces de luz en incidencia normal.

Por otro lado el haz luminoso que se refleja perpendicularmente en P, vuelve a O, y dado que en esta superficie tiene un grado de lisura superior, pero con una rugosidad no despreciable, verifica el mismo fenómeno pero con intensidades más débiles. Al estar la lámina rodeada por el mismo medio dieléctrico (en nuestro caso aire), ambos haces subtienden el mismo ángulo crítico. En estas condiciones al observar por transmisión la lámina podemos observar un punto central luminoso rodeado de un círculo brillante de menor intensidad y una corona circular de intensidad más débil cuyos radios están comprendidos entre PR, PR' y PS, PS'.

Sea $ON=r$, de la definición de ángulo crítico

$$\text{sen } \phi_{cr} = \frac{1}{n} = \frac{ON}{PN} = \frac{r}{(r^2 + d^2)^{1/2}} \quad [1]$$

se tiene

$$(r^2 + d^2) = n^2 \cdot r^2 \quad ,$$

de donde se obtiene

$$d = r \cdot (n^2 - 1)^{1/2} \quad , \quad [2]$$

En las condiciones especificadas y teniendo en cuenta la definición de ángulo de Brewster, (fig. 4) se tiene que

$$\text{tag } \phi_B = \frac{1}{n} \quad , \quad [3]$$

La componente paralela de la luz reflejada desde P bajo el ángulo ϕ_B se anula y su valor se encuentra entre O y ϕ_{cr} . En teoría ello debe traducirse en una lenta variación de la componente alrededor del ángulo donde ésta se anula. Por tanto, en la figura observada debe

existir una corona de más débil iluminación de radio $OB=r'$. Piénsese que el ángulo de Brewster presenta una variación lenta próxima al valor nulo de la componente paralela para un rango angular amplio en torno a ϕ_B . Desafortunadamente la medida directa de r' es difícil de realizar e incluso no nos ha sido posible determinarla experimentalmente ayudados por técnicas de polarización.

Hemos descrito en el apartado e) que si la lámina gira perpendicularmente formando un ángulo α entre la dirección del haz láser y la perpendicular a la lámina entonces el círculo central brillante se desplaza, como puede apreciarse en la figura correspondiente a la fotografía. Entonces observamos por transmisión dos puntos luminosos, que se corresponden a los puntos de incidencia y emergencia del haz respectivamente. En esta posición puede medirse simultáneamente el radio del círculo brillante y la distancia entre los dos puntos luminosos, que representan la desviación que el haz tiene en el proceso de refracción. De esta manera, si el haz procede del aire $n_0=1$, aplicando la ley de Snell

$$\text{sen } \alpha = n \cdot \text{sen } \phi_2 \quad ,$$

de donde deducimos

$$\phi_2 = \text{arc} \cdot \text{sen } \frac{\text{sen } \alpha}{n} \quad ,$$

siendo ϕ_2 , el ángulo formado en el interior de la lámina, (fig. 5).

Por otro lado la desviación experimentada por el haz al atravesar la lámina, cumple

$$e = d \cdot \text{tg } \phi_2 \quad , \quad [4]$$

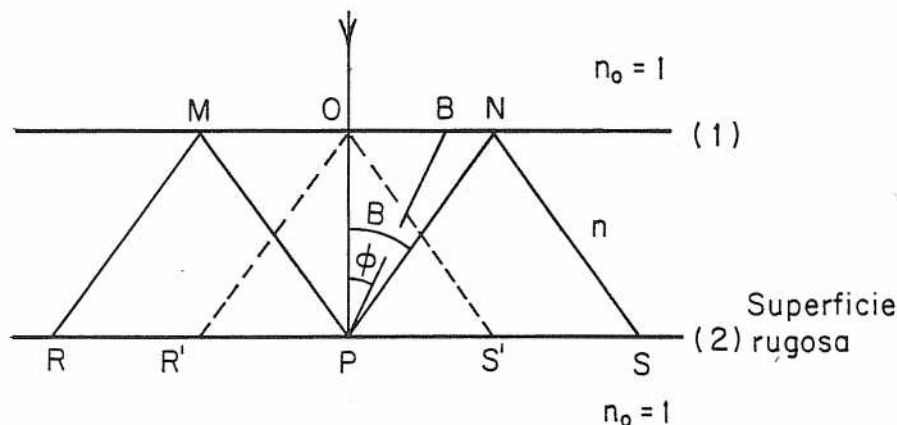


Fig. 4.— Disposición geométrica del ángulo de Brewster y crítico.

de consideraciones trigonométricas, obtenemos

$$e = d \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arc} \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{n} \right) \right] . \quad [5]$$

En estas condiciones la medida del radio del círculo central brillante y la distancia entre los dos puntos luminosos observados, supuesto conocido el ángulo de incidencia proporcionan la medida simultánea del índice de refracción n y el espesor de la lámina a través del siguiente sistema de ecuaciones:

$$d = r \cdot (n^2 - 1)^{1/2} , \quad [6.a]$$

$$e = d \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arc} \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{n} \right) \right] , \quad [6.b]$$

determinados previamente α , e y r . Siendo α el ángulo de incidencia, e la distancia entre los dos puntos brillantes y r el radio del círculo central brillante.

Es interesante observar que la primera de las ecuaciones del sistema establece para un índice de refracción constante una relación lineal entre el espesor y el radio del círculo central brillante, por lo que su representación gráfica es una recta.

Hemos utilizado como material metil-metacrilato que es ligeramente birrefringente. Sus valores difieren a partir de la cuarta cifra decimal por lo que hemos tomado la aproximación

$$n = \frac{n_1 + n_0}{2} . \quad [7]$$

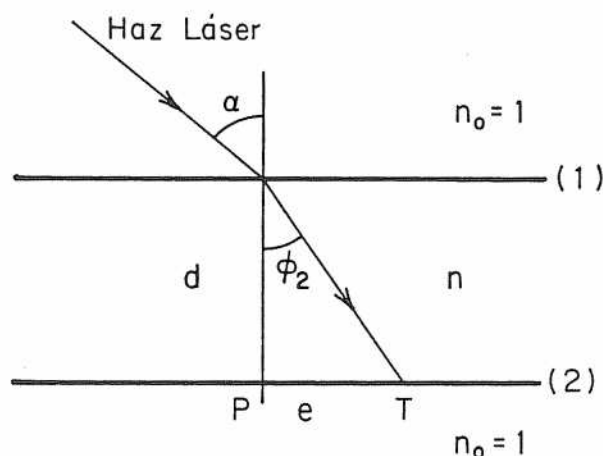


Fig. 5.— Disposición geométrica para el cálculo de la desviación del haz luminoso al pasar a través de la lámina.

De lo anterior deducimos que para cada dirección específica, la representación gráfica del espesor d en función de r es también una recta pero su coeficiente angular cambia, por lo que ambas tienen distinta inclinación.

De las consideraciones realizadas sobre la observación de la franja brillante circular cuando es realizada en condiciones de máxima intensidad y definición, podemos concluir que está conectada con la rugosidad de la segunda superficie a través de la reflexión difusa que realiza el haz del láser sobre una pequeña zona espacial, que aparece como determinante en la formación de dicho máximo. Si adoptamos como modelo de rugosidad una función de distribución gaussiana con una anchura a media altura $\delta x = k(\lambda/m)$, donde k es una constante, podemos establecer una relación entre el parámetro grado de lisura con la formación y propiedades de dicho máximo.

Cuando el haz láser incide sobre la lámina con un ángulo α , hemos observado entonces, que este máximo se desplaza debido al fenómeno de la refracción que tiene el haz incidente. En incidencias rasantes, el punto luminoso del haz láser se traduce sobre la superficie en un segmento con iluminación decreciente, del centro a los extremos de éste. Cada uno de sus puntos, si las condiciones de rugosidad de la segunda superficie son las adecuadas, produce una serie de franjas circulares yuxtapuestas con iluminación decreciente y deformación de la zona oscura por el desplazamiento de las mencionadas franjas brillantes.

4. CONCLUSIONES

Hemos llegado a establecer en forma analítica las ecuaciones que permiten determinar simultáneamente el índice de refracción y el espesor de la lámina de caras plano-paralelas.

Al mismo tiempo hemos obtenido un método gráfico para verificar el grado de birrefringencia de un material, pues ello se traduciría en cambios según direcciones específicas.

También hemos llegado a la posibilidad de establecer una relación entre el grado de lisura de la superficie rugosa con la formación e intensidad que presentan las zonas centrales brillantes.

Por otro lado, la utilización de la simple técnica fotográfica se muestra como suficiente para resolver con un adecuado grado de aproximación (estimado superior al 5% con técnicas de metrología dimensional) la extracción de resultados de los parámetros característicos d y n .

BIBLIOGRAFIA

1. P. GONZALO, A. CASTELLANOS: "Método sencillo para determinación del índice de refracción de una lámina de vidrio esmerilado por reflexión total". Revista de Física (pendiente de publicación).

★ ★ ★