



Abril 17-19, La Habana

Despolarización de la luz en la dispersión por superficies cilíndricas rugosas

R. Aparicio[†], F. Perez Quintián y M. A. Rebollo

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina; arodolf@fi.uba.ar[†], fperez@fi.uba.ar, mrebollo@fi.uba.ar

[†] Autor para la correspondencia

Recibido el 1/02/2008. Aprobado en versión final el 7/04/2008

Sumario. A partir de luz linealmente polarizada, se estudia el cambio del estado de polarización (despolarización) en la dispersión por cilindros de acero inoxidable, espejados y de rugosidad creciente. Las curvas experimentales de la intensidad dispersada en función del ángulo de observación indican una correlación entre el aumento de la rugosidad y la variación del valor medido de la intensidad dispersada en la dirección de reflexión especular sobre el plano formado por la dirección de incidencia y el eje del cilindro (plano de incidencia). Los datos obtenidos con el cilindro espejado se cotejan con los resultados de un modelo numérico basado en la óptica geométrica. En el caso de los cilindros rugosos, sus datos experimentales se comparan con los resultados de la resolución numérica, empleando la teoría vectorial de Kirchhoff, de una expresión integral para el campo dispersado. La forma general de las curvas numéricas coincide con la de las curvas experimentales, aunque se observan ciertas diferencias entre los valores medidos y los calculados para la intensidad dispersada en el plano de incidencia y cerca de él. Se analiza la relación entre estas diferencias y los efectos de reflexiones múltiples y de sombra, efectos que no están considerados en la teoría de Kirchhoff empleada.

Abstract. Starting from linearly polarized light, the change of state of polarization (depolarization) is studied in the scattering of light by rough stainless steel cylinders and by mirrored cylinders as well. Experimental curves of intensity of depolarized light vs. observation angle are obtained. These data indicate a correlation between the increase of roughness and the variation of the measured value of intensity of light scattered in the specular-reflection direction on the global incidence plane, the plane formed by the incidence direction and the cylinder axis. Information obtained from the mirrored cylinder is compared to the results of a geometrical optics-based numerical model. In the case of rough cylinders, the experimental data are compared to the results of the numerical resolution of an integral expression for the scattered field using the Kirchhoff's vector theory. The experimental and numerical plots have similar shapes, although differences between measured and calculated values of intensity on the global plane of incidence, and near of it, are observed. The relation between these differences and multiple-scattering and shadow effects is analyzed. These effects are not considered in the used Kirchhoff's theory.

Palabras clave. Dispersión 42.25.Fx, polarización 42.25.Ja, integración numérica 02.60.Jh, rugosidad 68.35.Ct.

1 Introducción

La inspección de superficies es de gran relevancia en numerosos procesos tecnológicos donde las propiedades superficiales son de importancia decisiva. Entre los métodos de inspección no destructivos, los métodos ópticos se fundamentan en el estudio de las propiedades de la luz

reflejada o dispersada por la superficie estudiada.¹⁻³

El estudio analítico, numérico y/o¹ experimental de la dispersión de luz por superficies rugosas ha progresado en grado diferente de acuerdo con la forma de la superficie media, la de rugosidad nula.

La dispersión de luz por superficies planas rugosas ha sido ampliamente estudiada.⁴⁻⁶ En particular, la polari-

zación de la luz dispersada se ha estudiado experimentalmente tanto en superficies dieléctricas^{7,8} como en superficies metálicas.^{9,10}

Por el contrario, los estudios sobre la dispersión de luz por superficies cilíndricas rugosas son mucho más recientes.¹¹⁻¹⁹ Todos estos trabajos con superficies cilíndricas desarrollan modelos ópticos para el análisis de la intensidad de la luz dispersada sin tener en cuenta el carácter vectorial de la luz, es decir, su estado de polarización. En cambio, este trabajo se dedica al estudio de la relación entre el cambio del estado de polarización y la rugosidad de la superficie cilíndrica dispersora.

2 Dispositivo experimental

La intensidad dispersada se mide siguiendo la reflexión especular producida por un cilindro espejado, es decir, sobre el llamado cono de reflexión (ver Fig. 1). El montaje experimental se muestra en la Fig. 2, que corresponde a una vista superior del plano x - z (plano de incidencia global), definido por el eje del cilindro (eje z) y el haz incidente.

Un haz de láser de He-Ne atraviesa un polarizador lineal que define las direcciones horizontal y vertical del campo eléctrico incidente:

$$\begin{aligned} \hat{e}_{iH} &= \cos\alpha \hat{e}_x + \sin\alpha \hat{e}_z & \text{pol. inc. horizontal} \\ \hat{e}_{iV} &= \hat{e}_y & \text{pol. inc. vertical} \end{aligned} \quad (1)$$

El sistema de filtro espacial y lente determina el plano de Fourier sobre el detector de intensidad luminosa.² El ángulo de incidencia es $\alpha = 52,4^\circ$. El detector es un fotodiodo de silicio y está montado sobre un brazo que rota siguiendo la circunferencia iluminada de la Fig. 1, formando un ángulo ψ con el plano x - z . Cuando un rayo incidente se refleja sobre el cilindro espejado en un punto con posición angular ϕ respecto del plano x - z , el ángulo ψ del rayo reflejado vale 2ϕ si el detector está suficientemente alejado del cilindro. Delante del detector se coloca un polarizador-analizador para estudiar la polarización del haz dispersado. Este polarizador puede rotar alrededor del eje correspondiente a la dirección de reflexión. Con el motor se hace rotar al cilindro, lo que permite considerar que se mide la intensidad media dispersada por un gran número de superficies estadísticamente equivalentes.

3 Cilindro espejado

Con el dispositivo de la Fig. 2 se mide la intensidad reflejada por cilindros espejados. Estos cilindros son agujas de rodamientos cilíndricos, de acero inoxidable, fabricados por la firma INA (modelo NRB5X39,8-G2; <http://medias.ina.de/medias/es!hp/>) según normas DIN 5402-3 / ISO 3096. Tienen 4 cm de longitud y 5 mm de diámetro, con una rugosidad (media aritmética de las alturas) $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ (según la hoja de datos del fabricante). Midiendo con un rugosímetro electromecánico, se obtiene una rugosidad (desviación estándar de las altu-

ras) $\sigma = 0,12 \mu\text{m}$. Si la distribución de alturas respecto de la superficie cilíndrica ideal es gaussiana, estas rugosidades son tales que $R_a \approx 0,8 \sigma$.⁶

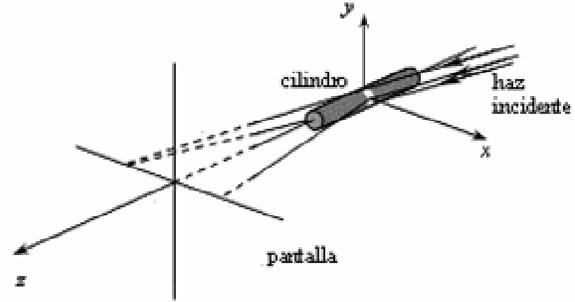


Figura 1. Cono de reflexión producido por un cilindro liso. La intensidad varía a lo largo de la circunferencia iluminada sobre la pantalla.

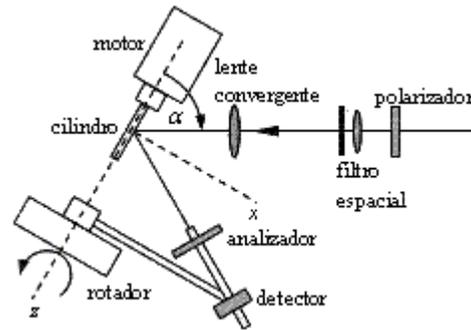


Figura 2. Esquema del equipo experimental. El ángulo de incidencia es α y ψ es el ángulo de rotación del detector alrededor del eje z .

3.1 Medición de la intensidad reflejada. La luz incidente está polarizada linealmente según la Ec. (1), y³ como la superficie es metálica, la luz reflejada tiene polarización elíptica. El segundo polarizador (analizador) se orienta de tal modo que se detecte, para una dada dirección de reflexión, un mínimo de intensidad, I_{MIN} . En este caso, el eje de transmisión del analizador está en la dirección del eje menor de la elipse de polarización del haz reflejado. Los datos experimentales así tomados se grafican con círculos en la Fig. 3, en función del ángulo ψ . También se miden la intensidad máxima (correspondiente al eje mayor de la elipse) y la orientación del eje de transmisión del analizador (que da la orientación de la elipse), aunque no se presentan estos datos porque se considera que en su medición no se tiene tanta sensibilidad como en el caso de la intensidad mínima.

3.2 Modelo numérico para la intensidad reflejada. Los datos obtenidos con el cilindro espejado se cotejan con los resultados de un modelo numérico basado en la óptica geométrica. Un parámetro de este modelo es el índice de refracción n del material. Se proponen dos variantes del índice de refracción, un índice constante y otro variable con el ángulo de incidencia local α_i (formado por la normal local de la superficie y la dirección de incidencia). Este índice de refracción variable intenta

simular el efecto de la rugosidad, siendo ésta muy pequeña en este caso, teniendo en cuenta que la rugosidad efectiva de una superficie disminuye cuando la incidencia es más rasante.

El ajuste numérico de los datos experimentales resulta en la curva de trazos de la Fig. 3 para n constante, y en la curva continua para n variable. Los correspondientes valores del índice de refracción son:

$$\begin{aligned} \text{índice constante: } n &= 2,33 + i 0,099 \\ d &= 0,76 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{índice variable: } n &= 2,45 + i 2,90 + i 0,62 \cos \alpha_i \\ d &= 0,07 \end{aligned}$$

La cantidad d es una medida del apartamiento de los datos experimentales respecto de la curva de ajuste. Al variar los parámetros del ajuste, se registra el desvío medio de los datos respecto de la curva. El mínimo de estos desvíos medios es d . En la Fig. 3 se observa que la forma de la curva experimental se corresponde con la predicha por el modelo geométrico (el pequeño pico de puntos experimentales para $\psi \cong 50^\circ$ se debe a un reflejo no deseado en el brazo que sostiene al detector). La intensidad medida se grafica normalizada a su valor máximo.

El modelo numérico también permite obtener la intensidad máxima reflejada, que sumada a la mínima da la intensidad total reflejada, la que se mide sin el analizador delante del detector en la Fig. 2. Esto permite contrastar sus resultados con los predichos por una expresión analítica de la intensidad total reflejada,¹⁹ obteniéndose una excelente coincidencia.

4 Cilindros rugosos

Los cilindros rugosos se preparan esmerilando los espejados con polvo abrasivo de granulometría 400, 150 y 90. Se obtienen valores de rugosidad $\sigma = 0,53; 1,50$ y $1,67 \mu\text{m}$, respectivamente. Las correspondientes longitudes de correlación de las superficies de estos cilindros son $T \cong 10, 15$ y $17 \mu\text{m}$.

4.1 Medición de la intensidad dispersada. La Fig. 4 muestra los datos experimentales de la intensidad mínima I_{MIN} (normalizada a su valor máximo) en función del ángulo de dispersión ψ .

El efecto más notable que se puede observar en los gráficos de la Fig. 4 es el aumento de la intensidad dispersada mínima con la rugosidad de la superficie cuando se mide en el plano de incidencia global, esto es, cuando se mide I_{MIN} para $\psi = 0^\circ$. Este valor no nulo de la intensidad indica una polarización cruzada o despolarización de la luz: incidiendo con polarización horizontal se mide una componente vertical, y viceversa. Estas componentes del campo dispersado para $\psi = 0^\circ$ tienen las direcciones:

$$\begin{aligned} \hat{e}_{dH} &= \cos \alpha \hat{e}_x - \sin \alpha \hat{e}_z & \text{pol. disp. horizontal} \\ \hat{e}_{dV} &= \hat{e}_y & \text{pol. disp. vertical} \end{aligned} \quad (2)$$

Las curvas experimentales de la Fig. 4 para la muestra de rugosidad $\sigma = 0,53 \mu\text{m}$, en círculos negros, presentan sus máximos desplazados con respecto a los máximos de

las curvas para las otras rugosidades. Este tema queda pendiente de estudio, pero en principio se podría relacionar con algún inconveniente en la toma de datos, ya que hay que corregirlos en el tiempo debido a variaciones de la intensidad de salida del láser.

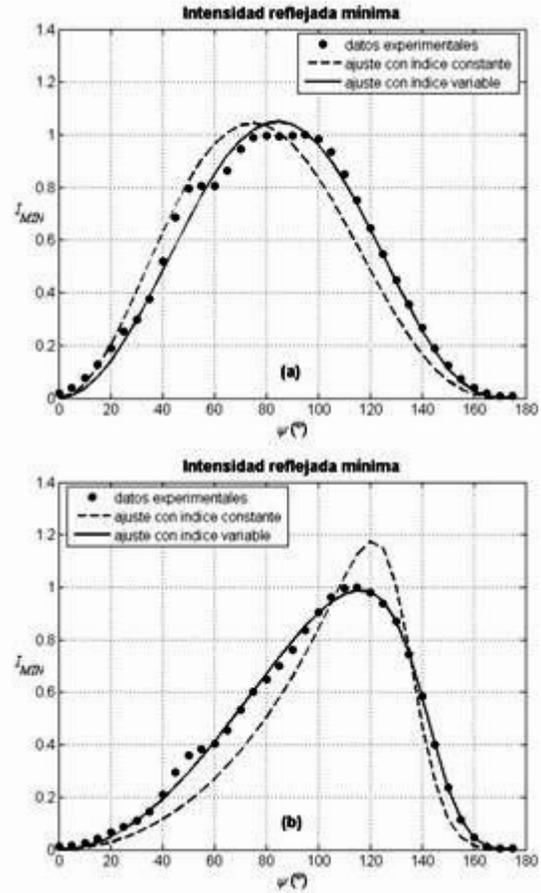


Figura 3. Variación de la intensidad reflejada mínima con el ángulo barrido por el detector: (a) polarización lineal incidente horizontal, (b) polarización vertical.

Con el fin de estudiar la aparente correlación entre el aumento de la rugosidad y la variación del valor medido de la intensidad dispersada en la dirección de reflexión especular sobre el plano de incidencia global, se toman fotografías de los diferentes cilindros colocando una cámara CCD en lugar del detector de la Fig. 2, sin la lente convergente. Se ilumina el cilindro rugoso con cada una de las polarizaciones incidentes definidas por la Ec. (1) y se registra la imagen de la región iluminada colocando el eje del analizador en cada una de las direcciones de la Ec. (2).

La Fig. 5 muestra las imágenes del cilindro más rugoso (rugosidad $\sigma = 1,67 \mu\text{m}$) mientras rota, iluminándolo con polarización incidente horizontal. Estos registros tienen diferentes relaciones nivel de blanco/intensidad. Con incidencia vertical se obtienen imágenes similares.

Para ambas polarizaciones incidentes, se observa que la luz reflejada con la misma polarización que la incidente proviene mayormente de zonas de la superficie próxi-

mas al plano de incidencia global (de puntos con posición angular $\phi \approx 0^\circ$ sobre la circunferencia del cilindro). En cambio, la luz dispersada con polarización cruzada (\hat{e}_{dV} para \hat{e}_{iH} , o \hat{e}_{dH} para \hat{e}_{iV}) proviene de una región más amplia, esto es, se observa luz dispersada aún por puntos para los cuales la incidencia es prácticamente rasante ($\phi \approx 90^\circ$).

La Fig. 6 muestra los perfiles de intensidad de las imágenes anteriores haciendo un promedio en la dirección del eje del cilindro. Las intensidades se registran con el mismo tiempo de exposición y se normalizan al máximo de la intensidad reflejada con la misma polarización (polarización directa). Se observa claramente que la polarización cruzada proviene de regiones más amplias.

La correlación entre el aumento de la rugosidad y la variación del valor medido de la intensidad dispersada para $\psi = 0^\circ$ se puede apreciar en la Fig. 7, donde se representan los perfiles de las intensidades reflejadas con polarización cruzada normalizados al mismo tiempo de exposición, para las diferentes rugosidades.

4.2 Modelo numérico para la dispersión. Para tener en cuenta la naturaleza vectorial de las ondas electromagnéticas cuando son dispersadas por una superficie rugosa, se puede emplear una expresión integral para el campo dispersado E_d por una superficie S en un punto r lo suficientemente lejos del dispersor:²⁰

$$E_d(r) = -ik \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \hat{k}_d \times \int_S [(\hat{n}_0 \times E) - \sqrt{\mu_1/\epsilon_1} \hat{k}_d \times (\hat{n}_0 \times H)] e^{-ik_d \cdot r_0} dS(r_0) \quad (3)$$

donde k es el módulo del vector de onda incidente (y del dispersado), $k_d = k\hat{e}_r$ es el vector de onda dispersado que apunta según el versor $\hat{e}_r = \hat{k}_d$ en la dirección de observación hacia el punto de vector posición r , \hat{n}_0 es el versor normal exterior a la superficie, E y H son los campos eléctrico y magnético, ϵ_1 es la permitividad de la región en la cual se propaga la onda incidente, μ_1 es la permeabilidad magnética y r_0 está sobre la superficie del dispersor. Se denomina 1 a la región de incidencia, para distinguirla de la correspondiente al material del medio dispersor, región 2.

De acuerdo con la teoría de Kirchhoff, en la Ec. (3) los campos E y H sobre la superficie pueden expresarse como la suma de los incidentes y sus reflejados por el plano tangente local a la superficie, teniendo en cuenta los coeficientes de reflexión. Entonces, se obtiene una integral vectorial para el campo dispersado, que es una función sumamente complicada de las propiedades locales de la superficie. Por ello es muy difícil de manipular analíticamente, salvo en casos muy especiales. Esto ya es así para superficies rugosas planas, por lo cual el problema es aún mayor si se considera la geometría cilíndrica.

Si bien podría considerarse que la aparición de polarización cruzada es esperable para muestras rugosas, este efecto no se puede explicar en absoluto con el modelo

usual de la teoría vectorial de Kirchhoff para una superficie rugosa de conductividad infinita (conductor perfecto).⁶ Al evaluarse el campo dispersado E_d dado por la Ec. (3) usando el modelo de Kirchhoff para un conductor perfecto, para $\psi = 0^\circ$, con las polarizaciones incidentes horizontal \hat{e}_{iH} y vertical \hat{e}_{iV} , se obtiene como resultado un campo dispersado con igual polarización: horizontal \hat{e}_{dH} y vertical \hat{e}_{dV} , respectivamente.

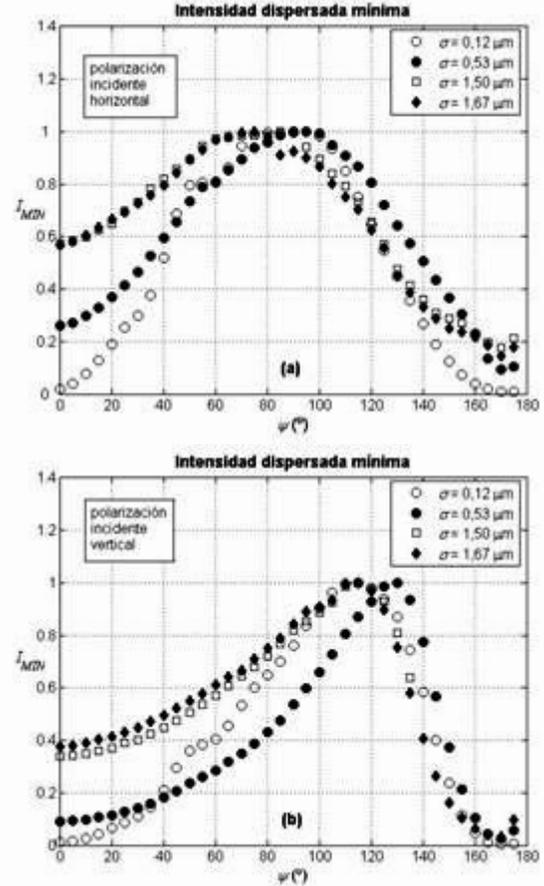


Figura 4. Intensidad mínima dispersada en la dirección de reflexión especular por cilindros de diferentes rugosidades, para incidencia con polarización: (a) horizontal, y (b) vertical. También se muestran los datos para el cilindro espejado, $\sigma = 0,12 \mu\text{m}$.

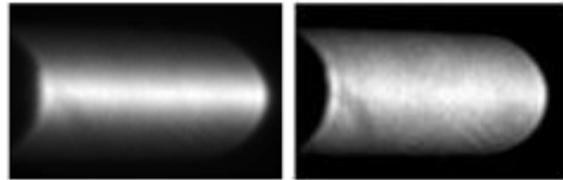


Figura 5. Imagen del cilindro rotando iluminado con polarización incidente horizontal: (izq.) detección horizontal, (der.) detección vertical.

Con el fin de estudiar si la discrepancia con los resultados experimentales radicaba en la suposición de conductor perfecto, se desarrolló un modelo numérico que resuelve la integral para el campo eléctrico dispersado

considerando un material con índice de refracción complejo. En este modelo numérico se genera una superficie rugosa cilíndrica con el método del promedio móvil, simulando el área iluminada de la Fig. 5. Se toman como parámetros el radio de los cilindros espejados, junto con la rugosidad y la longitud de correlación medidas en los cilindros rugosos. Sobre esta superficie se resuelve numéricamente la integral para el campo eléctrico dispersado empleando la teoría vectorial de Kirchhoff y se calcula la intensidad mínima dispersada en la dirección de reflexión especular. Se repite el procedimiento con N superficies generadas para finalmente obtener la intensidad media dispersada. Esto se hace calculando el promedio, para cada ψ , de los N valores $I_{MIN}(\psi)$.

La Fig. 8 muestra, en círculos, el resultado numérico para la intensidad mínima media dispersada (en unidades arbitrarias) por $N = 20$ superficies cilíndricas, generadas con rugosidad $\sigma = 1,67 \mu\text{m}$, equivalentes a las superficies que dispersan la intensidad medida y graficada con diamantes en la Fig. 4.

Conforme se aumenta el número N de superficies, el promedio muestra cada vez menos oscilaciones al variar el ángulo ψ , tendiendo finalmente a una curva suave (graficada de mayor espesor en la Fig. 8), similar a la que pasaría por los puntos experimentales de la Fig. 4 salvo cuando ψ se acerca a 0° . La comparación de los resultados experimentales con los numéricos revela inmediatamente que, aún desechando la suposición de conductor perfecto, la teoría de Kirchhoff no explica la despolarización para el ángulo $\psi = 0^\circ$. Entonces, como próximo paso se sugiere el estudio de la relación entre la despolarización y las reflexiones múltiples.

El cambio del estado de polarización en la dispersión de luz por superficies rugosas planas y su relación con la dispersión múltiple se ha estudiado tanto teórica como experimentalmente.^{6,21} No es el mismo caso para las superficies cilíndricas. Por ello, al momento de presentar este trabajo se está desarrollando con un modelo numérico para estudiar la relación entre la dispersión con polarización cruzada y las reflexiones dobles (el caso más simple de reflexiones múltiples) en la superficie del cilindro rugoso.

5 Conclusiones

En el presente trabajo se muestra que un modelo geométrico puede ser utilizado para describir el estado de polarización de la luz reflejada por superficies cilíndricas espejadas. Los resultados experimentales concuerdan razonablemente con la predicción teórica. La introducción de un índice de refracción complejo variable de manera similar a la rugosidad aparente con el ángulo de incidencia local, produce mejoras sustanciales en el resultado. Un paso a seguir es el estudio de la relación entre el índice variable y la rugosidad.

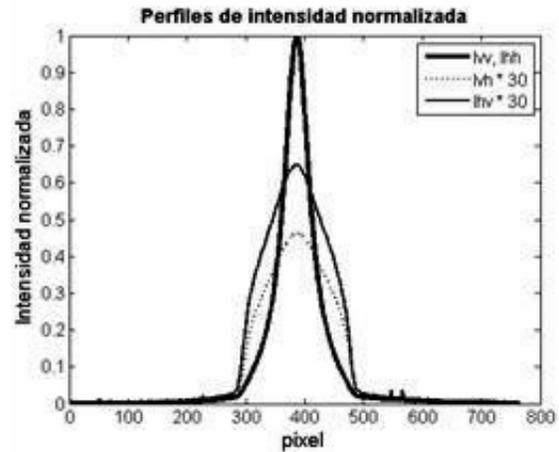


Figura 6. Perfiles de intensidad dispersada con polarización directa (Ivv, Ihh) y con polarización cruzada (Ihv, Ivh).

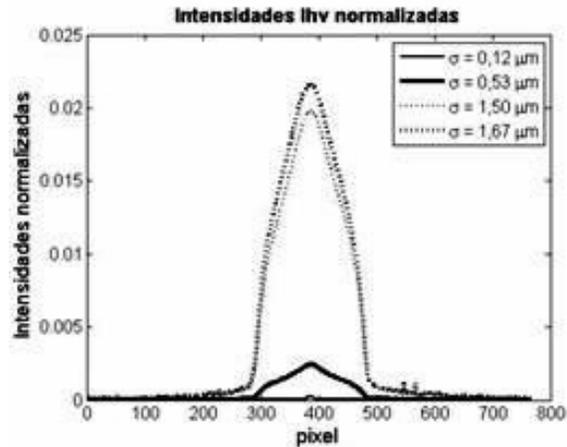


Figura 7. Perfiles de intensidad dispersada con polarización cruzada por cilindros con diferentes rugosidades: incidencia horizontal – detección vertical.

Para rugosidades mayores, como el modelo vectorial de Kirchhoff aplicado a un conductor perfecto no explica las observaciones experimentales, se resuelve numéricamente la integral para el campo eléctrico dispersado calculando localmente los coeficientes de reflexión. Así se determina la intensidad mínima dispersada en la dirección de reflexión especular. La comparación de estos resultados numéricos con los experimentales indica que la teoría de Kirchhoff no explica la despolarización en el plano de incidencia global, por lo que se ha comenzado con el análisis de la relación entre la despolarización y las reflexiones múltiples.

También queda pendiente el estudio de los otros datos experimentales recogidos, como los que se refieren a la intensidad máxima dispersada y el ángulo de inclinación de la elipse de polarización de la luz reflejada.

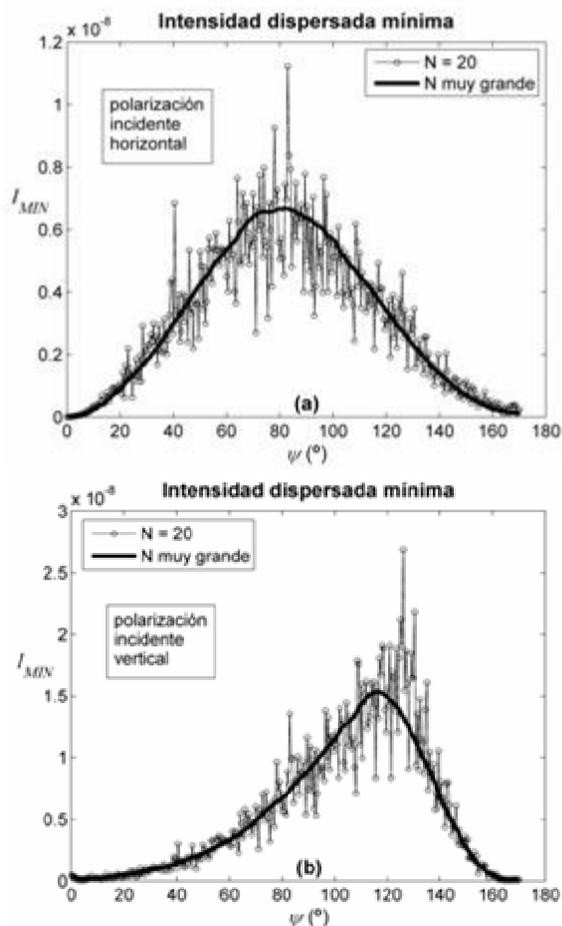


Figura 8. Resultados numéricos de la intensidad mínima promedio dispersada en la dirección de reflexión especular: (a) incidencia horizontal, (b) incidencia vertical.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Proyecto "Técnicas de Análisis de la Luz Dispersada para Aplicaciones Industriales" (Código 0105/I018) de la Universidad de Buenos Aires – Argentina.

Referencias

1. S. Tolansky, R. W. B. Stephens and O. S. Heavens, *Br. J. Appl. Phys.*, Vol. 8, N° S6, pp. S5-S12 (1957).
2. D. J. Whitehouse, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 20, N° 10, pp. 1145-1155 (1987).
3. J. C. Stover, *Optical Scattering: Measurement and Analysis*, 2nd edition (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham,

WA, USA, 1995)

4. M. Kerker, *The scattering of light and other electromagnetic radiation* (Academic Press, New York and London, 1969).
5. P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* (Pergamon, London, 1963).
6. J. A. Ogilvy, *Theory of wave scattering from random rough surfaces* (Adam Hilger, Bristol, 1991).
7. S. F. Nee, R. Dewees, R. Nee, L. F. Johnson and M. B. Moran, *Appl. Opt.*, Vol. 39, N° 10, pp. 1561-1569 (2000).
8. T. A. Germer and M. J. Fasolka, in *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies*. A. Duparré and B. Singh eds., Proc. SPIE, Vol. 5188, pp. 264-275 (2003).
9. T. A. Germer, T. Rinder and H. Rothe, in *Scattering and Surface Roughness III*. Z. Gu and A. Maradudin eds., Proc. SPIE, Vol. 4100, pp. 148-155 (2000).
10. S. F. Nee and T. Nee, *Opt. Eng.*, Vol. 41, N° 5, pp. 994-1001 (2002).
11. C. Babu Rao, A. V. Ananthlakshmi and R. Kesava-moorthy, in *Optics and optoelectronics: Theory, Devices and Applications*, pp. 298-301. O. Nijhawan, A. Gupta, A. K. Musla and K. Singh eds., Narosa Publishing House, New Delhi (1999).
12. G. Da Costa and J. Ferrari, *Appl. Opt.*, Vol. 36, N° 21, pp. 5231-5237 (1997).
13. F. Perez Quintián, *Dispersión de luz por superficies cilíndricas rugosas*. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (2000).
14. R. Berlasso, F. Perez Quintián, M. A. Rebollo, C. A. Raffo and N. Gaggioli, *Appl. Opt.*, Vol. 39, N° 31, pp. 5811-5819 (2000).
15. F. Perez Quintián, M. A. Rebollo, R. Berlasso and N. Gaggioli, "Roughness Measurement on Cylindrical Surfaces by Optical Methods". Proceedings of the International Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry. Florianópolis, Brazil (1999).
16. L. M. Sánchez Brea, P. Siegmann, M. A. Rebollo and E. Bernabeu, *Appl. Opt.*, Vol. 39, N° 4, pp. 539-545 (2000).
17. L. M. Sánchez Brea, P. Siegmann, E. Bernabeu, M. A. Rebollo, F. Perez Quintián and C. A. Raffo, *Wire J. Intern.*, Vol. 33, N° 8, pp. 124-127 (2000).
18. L. M. Sánchez Brea, *Método óptico para la caracterización automática de defectos superficiales en hilos metálicos finos*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid (2001).
19. P. Siegmann, *Desarrollo de un prototipo industrial para la detección en línea de producción de defectos en superficie de hilos metálicos finos*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid (2002).
20. Ref. 6, p. 124.
21. K. A. O'Donnell and E. R. Mendez, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 4, N° 7, pp. 492-503 (1987).