

Caracterización de superficies rugosas inmersas en un líquido transparente

M F Ruiz Gale, E N Hogert and N G Gaggioli

Laboratorio de Óptica y Láser, IAMEND, Dep. ENDE., Comisión Nacional de Energía

Atómica; CC No. 8, Suc. 29B, 1429, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: ruizmf@cnea.gov.ar

Resumen.

Algunos trabajos han estudiado la dispersión de luz por una superficie rugosa inmersa en un líquido. En ellos se asumió que la luz dispersada por dicho sistema era equivalente a la dispersada por una superficie rugosa ficticia con una textura diferente. Sin embargo, esta suposición es válida sólo bajo determinadas condiciones.

La finalidad de este trabajo es estudiar y discutir más detalladamente el significado de “superficie equivalente” asociado al sistema superficie rugosa-líquido. Para ello se utilizó la solución general Kirchhoff para la dispersión de luz por superficies rugosas.

Como resultado de este estudio se establecieron las condiciones bajo las cuales la intensidad media dispersada (IMD) de luz por una superficie rugosa inmersa en un líquido puede ser cuasi indistinguible de la dispersada por una superficie no sumergida con una “textura equivalente”. Se define como textura T de una superficie rugosa a la siguiente expresión:

$$T = \frac{S}{R} \quad (1)$$

donde S es la longitud de correlación y R la rugosidad.

Se encontró una expresión para la textura de la superficie equivalente en función de la textura de la superficie real sumergida y del índice de refracción del líquido que la cubre. Esta es

$$\frac{T'}{\sigma'} = \frac{n_0}{n} \frac{T}{\sigma}, \quad (2)$$

donde n_0 es el índice de refracción del aire y n del líquido. Las primas denotan los parámetros de la superficie equivalente.

La ecuación (2) es válida dentro de la aproximación de ángulos chicos, es decir para ángulos de incidencia y observación menores a 10° . En este trabajo se analiza la posibilidad de extender el rango de validez de esta ecuación para ángulos algo mayores.

También se discute las condiciones bajo las cuales es posible diferenciar las curvas de dispersión de luz dadas por la superficie sumergida y la equivalente.

Los resultados de este trabajo permiten evaluar las características de superficies rugosas sumergidas en un líquido con un índice de refracción conocido.

1. Introduction

La rugosidad de una muestra es el conjunto de irregularidades microscópicas de la superficie real. Esta puede caracterizarse mediante la longitud de correlación T de la muestra y la desviación cuadrática media σ de su perfil, y se conoce como textura superficial al factor T/σ .

Dentro del mundo de la tecnología se observan gran cantidad de piezas que han de estar en contacto unas con otras y se rozan a altas velocidades. El acabado final y la textura de una superficie son de gran importancia para definir la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y el aspecto externo de una pieza o material, por lo que su rugosidad es un factor importante a tener en cuenta [1-8].

Con el advenimiento del láser y de las cámaras CCD los métodos ópticos se están convirtiendo en una herramienta cada vez más poderosa de los END, principalmente en la determinación de las características superficiales de una muestra y su evolución temporal [9-16].

En general, al evaluar el estado superficial de un componente en la línea de producción, está sucio y cubierto de distintos aditivos utilizados en su fabricación. Por ello, es importante analizar cómo influyen estas sustancias en la determinación de su rugosidad por métodos ópticos. En este trabajo se analiza solamente la luz dispersada por una superficie rugosa cubierta con un líquido transparente.

Se tomará como punto de partida los estudios realizados por Beckmann [9]. Él estudió la dispersión de ondas electromagnéticas producida por superficies rugosas metálicas, encontrando una expresión teórica para la intensidad media dispersada en función T/σ . Posteriormente, se publicaron numerosos trabajos analizando la luz dispersada por diferentes superficies [17-24], Sin embargo ninguno de ellos trata sobre superficies muy rugosas ópticamente.

Aquí se discute con más detalle los conceptos de rugosidad aparente o textura aparente y se determina su rango de validez. Los resultados obtenidos describen las características de cualquier superficie inmersa en una sustancia, a semejanza de una pieza maquinada cubierta por un líquido lubricante durante su proceso de fabricación o una superficie rugosa corroída en un medio líquido. Se obtiene una relación entre la textura aparente del conjunto superficie rugosa- líquido y la textura de la superficie. Se muestra que si el ángulo de incidencia de la luz es menor que 10° , la intensidad media dispersada por el conjunto superficie rugosa- líquido es cuasi indistinguible de la intensidad media dispersada por otra superficie no inmersa cuya textura se igual a la textura aparente del conjunto.

2. Teoría y Resultados

Para analizar la intensidad media dispersada, que se llamará IMD o $\langle I \rangle$, por una superficie rugosa inmersa en un líquido de índice n se utilizó la expresión normalizada de la intensidad media dispersada obtenida por Beckman [9,15,25]. El factor de normalización es la intensidad media reflejada por un espejo perfecto ($\sigma = 0$).

2.1 Intensidad media dispersada por una superficie rugosa.

Un haz de luz monocromática de longitud de onda λ incide bajo en ángulo θ_1 sobre una superficie rugosa cuyo plano medio está en $z = 0$ (Figure 1). La luz dispersada es observa en la dirección dada por los ángulos θ_2 y θ_3 .

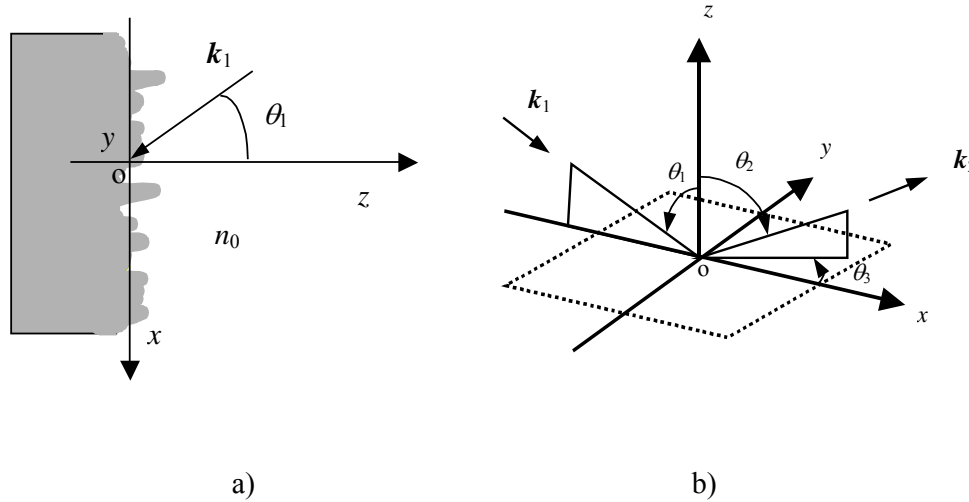


Figure 1. a) Sección transversal de una superficie rugosa, b) Geometría de la dispersión.

Se define $h(x,y)$ como la función altura de la superficie en el punto (x,y) . $h(x,y)$ es una variable aleatoria cuya función densidad de probabilidad $p(h)$ es gaussiana, siendo

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h^2 p(h) dh} . \quad (1)$$

$$p(h) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Se define la función de autocorrelación de la superficie como

$$C(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{\langle h(x_1, y_1) h(x_2, y_2) \rangle}{\sigma^2} . \quad (3)$$

En general, se supone que $C(x_1, y_1, x_2, y_2)$ es una función gaussiana dada por

$$C(\tau) = \exp\left(\frac{-\tau^2}{T^2}\right) , \quad (4)$$

donde τ es la distancia entre dos puntos cualesquiera (x_1, y_1) y (x_2, y_2) ,

Se puede demostrar [9] que, si la superficie es muy rugosa óptimamente ($\sigma \gg \lambda$) y cumple con las ecuaciones (2), (3) y (4), la intensidad media dispersada normalizada por esta superficie es

$$\langle I \rangle = \frac{\pi F^2 T^2}{A v_z^2 \sigma^2} \exp \left[- \left(\frac{v_{xy} T}{2 v_z \sigma} \right)^2 \right], \quad (5)$$

donde: A es el área iluminada;

\mathbf{k}_1 and \mathbf{k}_2 son los vectores de onda incidente y de observación respectivamente;

v_x , v_y , y v_z son las componentes del vector $\mathbf{v} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$; $v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$;

$|\mathbf{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (en el vacío),

$$F = \frac{1 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3}{\cos\theta_1 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}. \quad (6)$$

Si la muestra está inmersa en un medio de índice de refracción n_0 , las componentes de \mathbf{v} son iguales a

$$v_x = k n_0 (\sin\theta_1 - \sin\theta_2 \cos\theta_3), \quad (7)$$

$$v_y = -k n_0 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \quad (8)$$

$$v_z = -k n_0 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2). \quad (9)$$

2.2 Intensidad media dispersada por una superficie inmersa en un líquido

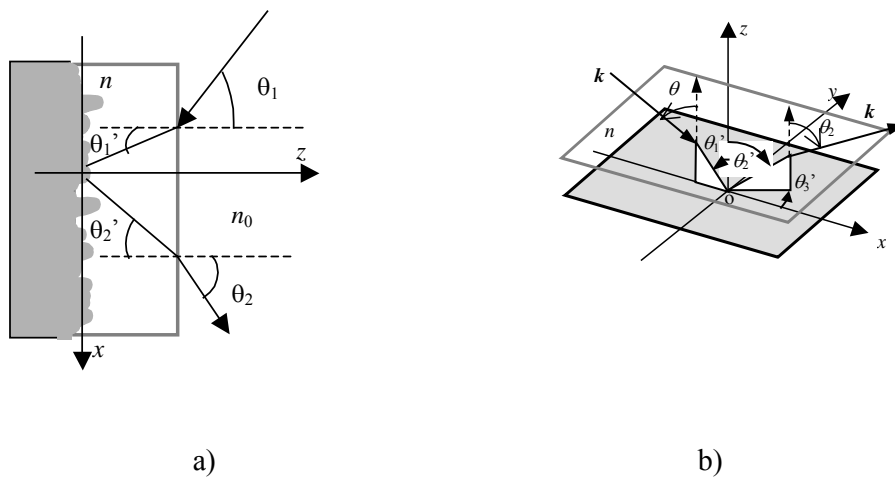


Figure 2.Diagrama esquemático del conjunto superficie rugosa-líquido a) Sección transversal b) Vista superior.

Si la superficie está inmersa en un líquido de índice de refracción n , con la interfase paralela al plano medio $z = 0$, los ángulos de incidencia y refracción sobre la superficie son θ_1', θ_2' y θ_3' como lo muestra la Figura 2. Bajo estas condiciones, y aplicando la ley de Snell en la interfase liquido-aire, se puede demostrar que la intensidad media dispersada por el conjunto superficie-líquido es igual a

$$\langle I' \rangle = \frac{\pi F'^2 T^2}{A v_z'^2 \sigma^2} \exp \left[- \left(\frac{v'_{xy} T}{2 v_z' \sigma} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

donde, $|k'| = nk$

$$F' = \frac{n^2 + \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_1} \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_2} - n_0^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3}{\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_1} \left(\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_1} + \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_2} \right)}, \quad (11)$$

$$v'_{xy} = n_0 k \sqrt{\sin^2 \theta_1 - 2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \sin^2 \theta_2} = v_{xy}, \quad (12)$$

$$v'_z = -k \left(\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_1} + \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_2} \right), \quad (13)$$

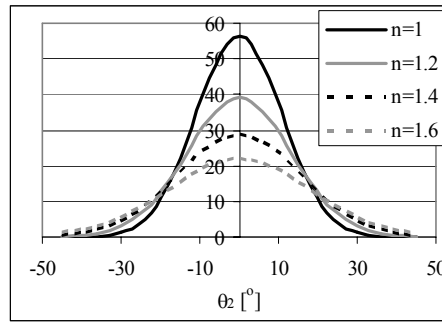


Figura 3: Curvas de Intensidad media dispersada por una superficie rugosa inmersa en un líquido, pasa for $\theta_1=0^\circ$ and $\theta_3=0^\circ$

La Figura 3 muestra las IMD por una superficie rugosa sin líquido ($n_0 = n = 1$) e inmersa en líquidos de diferentes índice n . Cuando n aumenta, la IMD se parece a la intensidad luminosa dispersada por una superficie de textura menor o mayor rugosidad. Se observa que las curvas dadas por las Eqs. (5) y (10) son similares pero no iguales. La comparación de estas curvas no es directa. Sin embargo, en la aproximación de ángulos pequeños, la IMD tiene una expresión gaussiana y ambas expresiones de intensidad puede ser comparadas

2.3 Aproximación de ángulos pequeños

En la aproximación de ángulos pequeños se tiene que $\sin \theta_1 \cong \theta_1$ y $\sin \theta_2 \cong \theta_2$. Por lo tanto, las IMD antes estudiadas (Ec. (5) y Ec (10)) se pueden aproximar por

$$\langle I_a \rangle = \frac{\pi T^2}{4Ak_0^2 n_0^2 \sigma^2} \exp \left[-\frac{(\theta_1^2 - 2\theta_1\theta_2 \cos \theta_3 + \theta_2^2) T^2}{16\sigma^2} \right], \quad (14)$$

where the a subscript indicates the approximation.

$$\langle I'_a \rangle = \frac{\pi T^2}{4Ak_0^2 n^2 \sigma^2} \exp \left[-\frac{(\theta_1^2 - 2\theta_1\theta_2 \cos \theta_3 + \theta_2^2) T^2 \left(\frac{n_0}{n}\right)^2}{16\sigma^2} \right]. \quad (15)$$

Donde el subíndice a indica aproximación.

La única diferencia entre las Ec(14) y Ec(15) es el cociente n_0/n . Una nueva textura llamada textura aparente puede ser definida como

$$\frac{T'}{\sigma'} = \frac{n_0}{n} \frac{T}{\sigma}, \quad (16)$$

Teniendo en cuenta la Ec (17), la Ec. (16) resulta,

$$\langle I'_a \rangle = \frac{\pi T'^2}{4Ak_0^2 n_0^2 \sigma'^2} \exp \left[-\frac{(\theta_1^2 - 2\theta_1\theta_2 \cos \theta_3 + \theta_2^2) T'^2}{16\sigma'^2} \right]. \quad (17)$$

Comparando la Ec (17) y Ec. (14) se observa que la intensidad media dispersada por una superficie de textura T/σ sumergida en un líquido de índice de refracción n es igual a la intensidad media dispersada por otra superficie de textura T'/σ' , resultando indistinguible estos dos casos diferentes. Teniendo esto en mente, se puede utilizar la expresión encontrada para la textura equivalente en de la ec. (5) y compararla con la ec. (10). Es decir, se compara la IMD sin aproximar y sin líquido pero utilizando la expresión (16) que tiene en cuenta el líquido con la ec. (10) que no es aproximada y considera un líquido.

3. Discusión de los Resultados

La Figura 4 muestra las curvas IMD para una superficie de textura T/σ inmersa en un líquido (Ec. (10)), y para una superficie sin sumergir (Ec. (5)), pero con una textura igual a la textura equivalente T'/σ' . Se observa una buena concordancia entre ambas.

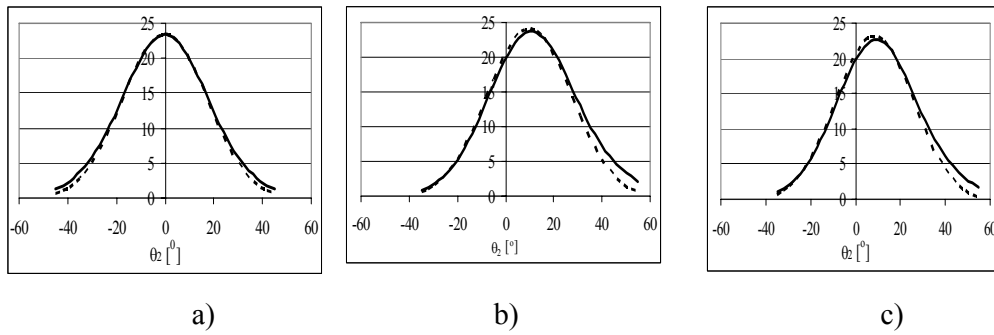


Figura 4 . Intensidad media dispersada por una superficie rugosa de textura $T/\sigma=15$ inmersa en un líquido de $n = 1.55$ (línea llena) y una superficie rugosa sin sumergir con una textura $T'/\sigma'=15/1.55=9.7$ (línea punteada) para: a) $\theta_1=0^\circ$ and $\theta_3=0^\circ$, b) $\theta_1=10^\circ$ and $\theta_3=0^\circ$, c) $\theta_1=10^\circ$ and $\theta_3=30^\circ$.

La aproximación para ángulos pequeños implica que ellos deben ser menor de 10° . Si embargo, se observa que, principalmente alrededor de la dirección especular, ambas IMD coinciden para ángulos mayores. Cuando la incidencia es normal, $\theta_1=0^\circ$, ambas curvas se superponen, comenzando a diferenciarse para ángulos de observación $\theta_2 > 20^\circ$. Cuando $\theta_1 > 10^\circ$, puede verse que ambas curvas se vuelven asimétricas diferenciándose una de la otra, principalmente para $\theta_2 > \theta_1$ (Figura 4c).

En la Figura 5, se grafican la diferencia relativa D entre las curvas de la Figura 4, donde

$$D = \frac{\langle I'(T/\sigma, n) \rangle - \langle I(T'/\sigma', n_o = 1) \rangle}{\langle I'(T/\sigma, n) \rangle_{MAX}} \quad (18)$$

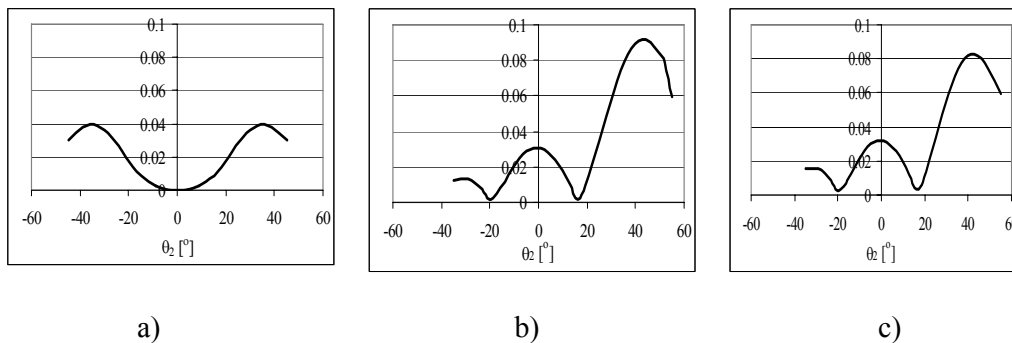


Figura 5. Diferencias relativas entre las IMD de una superficie inmersa y otra con una textura aparente para: a) $\theta_1=0^\circ$ and $\theta_3=0^\circ$, b) $\theta_1=10^\circ$ and $\theta_3=0^\circ$, c) $\theta_1=10^\circ$ and $\theta_3=30^\circ$.

Se observa que, para incidencia normal, la intensidad media dispersada por una superficie de textura T/σ inmersa en un líquido difiere en menos de un 4% de la intensidad media dispersada por una superficie de textura T'/σ' sin sumergir. Esto significa que las IMD son cuasi indistinguible pudiéndose cometer un error al determinar su rugosidad. Al aumentar el ángulo de incidencia, para $-35^\circ \leq \theta_2 \leq 25^\circ$

(Figuras 5b y 5c), el comportamiento es similar al de incidencia normal. Si el ángulo de incidencia $\theta_1 > 10^\circ$, la diferencia entre ambas curvas es significativa principalmente en la dirección especular.

Si $\theta_1 > 10^\circ$ la diferencia entre ambas curvas es significativa. En la Figura 6 se pone en evidencia este fenómeno, mostrando que la intensidad media dispersada por una superficie rugosa inmersa es muy asimétrica. Un observador puede así distinguir si la textura obtenida de un componente corresponde a una pieza limpia o inmersa en un líquido.

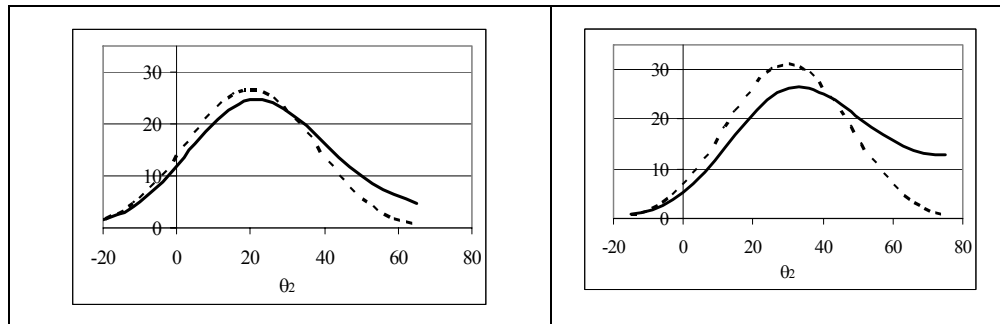


Figure 6. Intensidad media dispersada por una superficie rugosa de textura $T/\sigma=15$ inmersa en un líquido de índice de refracción $n = 1.55$ (línea llena) y para una superficie rugosa sin sumergir de textura $T'/\sigma'=15/1.55=9.7$ (línea punteada), a) $\theta_1 = 20^\circ$ and $\theta_3 = 0$ b) $\theta_1=30^\circ$ and $\theta_3 = 0$.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un estudio teórico para poder discernir la mejor configuración para determinar la rugosidad de una pieza cubierta por un líquido lubricante. La capacidad para determinar el ángulo óptimo de incidencia depende del sistema de error de medición.

Se ha demostrado que cuando el ángulo de incidencia es menor que 10° , la intensidad media dispersada por la superficie inmersa en un líquido es casi indistinguible a la intensidad dispersada por una superficie, no inmersa, con una textura a $\frac{T'}{\sigma'} = \frac{n_0 T}{n \sigma}$

Pudiéndose cometer un error al calcular la rugosidad σ .

Se puede concluir que para poder detectar la existencia de un líquido sobre una superficie rugosa el ángulo de incidencia debe ser mayor a 10° .

Referencias

- [1] Whitehouse D J. Surface metrology. Meas. Sci. Technol 1997; 8: 955-72.
- [2] Dagnall H. Exploring surface texture. Leicester: Rank Taylor Hobson; 1980.
- [3] Bennett J M. Surface finish and its measurement of Collected works in optics. vol 2 Washington DC: Optical Society of America; 1992.

- [4] Léger D, Mathieu E, Perrin J. Optical surface roughness determination using speckle correlation technique. *Appl. Opt.* 1975; 14: 872-77.
- [5] Ruiz Gale M F, Marengo J A, Landau M R, Hogert E N and Gaggioli N G. Digital speckle correlation for non-destructive testing of corrosion. *Proc. 7th ECNDT Copenhagen1998*; 1: 717-23.
- [6] Wang Chenggen Quan S H, Tay C J and Shang H M. Surface roughness measurement in the submicrometer range using laser scattering. *Opt. Eng.* 2000; 39 (6): 1597-601.
- [7] Sánchez Gil J A and Nieto Vesperinas. M Light scattering from random rough dielectric surface *J. Opt. Soc. Am. A* 1991; 8: 1270-86.
- [8] Scirripa G, Paoletti D, Ambrosini D and Guattari G. Electro-optic correlation for in situ diagnostics in mural frescoes. *Pure Appl. Opt.* 1997; 6: 557-63.
- [9] Beckmann P and Spizzichino A. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces.* New York: Pergamon Press; 1963.
- [10] Erf R K. *Speckle metrology.* New York: Academic Press; 1978.
- [11] Aparicio R, Ruiz Gale M F, Hogert E N, Landau M R, and Gaggioli N G. A step forward in the study of the electroerosion by optical methods. *Opt. Laser Eng.* 2003; 39: 645-61.
- [12] Ogilvy J A. *Theory of wave scattering from random rough surfaces.* 2nd ed. Bristol: IOP Publishing Ltd; 1992.
- [13] Stover J C. *Optical scattering measurement and analysis.* Bellingham: SPIE Optical Engineering Press; 1995.
- [14] Davies H. The reflection of electromagnetic waves from a rough surfaces. *Proc. Inst. Electr. Eng. Part 4.* 1954, 101: 209-14.
- [15] Chandley P J and Welford W T. A re-formulation of some results of P. Beckmann for scattering from rough surfaces. *Opt. Quant. Electron.* 1975; 7: 393-97
- [16] Bass F G and Fuks I M. *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces (International Series in Natural Philosophy vol. 93).* ed. C B Vesecky and J F Vesecky. Oxford: Pergamon; 1979.
- [17] Gaggioli N G and Roblin M L. Etudes des etats de surface par les proprietes de diffusion a l'infini en lumiere transmise. *Opt. Comm.* 1980; 32 (2): 209-13.
- [18] Croce P and Prod'Homme L. Contribution of immersion technique to light scattering analysis of very rough surfaces. *J. Optics* 1980; 11 (5): 319-27.

- [19] Perez Quintian F, Rebollo M A, Hogert E N, Landau M R and Gaggioli N G. Relationship between speckle correlation and refraction index variation. Application to roughness measurement. *Opt. Eng.* 1996; 35 (4): 1175.
- [20] Welford W T. Laser speckle and surface roughness. *Contemp. Phys.* 1980; 21 (4): 401-12.
- [21] Fuks I M. Wave diffraction by a rough boundary of an arbitrary plane-layered medium. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on.* 2001; 49 (4): 630-39.
- [22] Gu Z H, Fuks I M and Ciftan M. Grazing angle enhanced backscattering from a dielectric film on a reflecting metal substrate *Opt. Eng.* 2004; 43 (3): 559–67.
- [23] Calvo-Perez O, Greffet J J and Sentenac A. Scattering by randomly rough dielectric surfaces and rough dielectric films: influence of the height distribution. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 1999; 1: 560-65.
- [24] Ruiz Gale M F, Hogert E N, Landau M R and Gaggioli N G. Changing surfaces, a theoretical and experimental approach. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2004; 6 (2): 187-92.
- [25] Welford W T. Optical estimation of statistics of surface roughness from light scattering measurements. *Opt. Quant. Electron.* 1977; 9: 269-87.