

DIFFUSION DE LA LUMIÈRE LASER PAR DES MATÉRIAUX DIÉLECTRIQUES RUGUEUX ; APPLICATION À LA CARACTÉRISATION DE LA RUGOSITÉ SUPERFICIELLE

Leila GRAÏNI et Kaddour SAOUCHI

*Laboratoire LERICA, Département d'Électronique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,
Université Badji Mokhtar – Annaba, B.P. 12, 23000 Annaba, Algérie*

E-mail : graini_leila@yahoo.fr

RÉSUMÉ : La diffusion lumineuse est maintenant devenue une technique répandue de la télédétection pour caractériser la topographie des surfaces des matériaux rugueux. L'étude du champ diffusé permet dans certains cas de récupérer des paramètres distinctifs du diffuseur. Dans cet article, nous déterminons la répartition angulaire de la puissance lumineuse rétrodiffusée par une surface d'un matériau diélectrique rugueux en fonction des paramètres de la rugosité. Nous avons choisi de travailler dans le cas unidimensionnel, ce qui signifie que la surface est décrite seulement par son profil. L'interaction d'un champ électromagnétique avec la surface rugueuse donne un champ diffusé qui dépend des paramètres de cette surface (taille de rugosité), et des paramètres optiques, tels que la longueur d'onde.

MOTS-CLÉS : diffusion de la lumière laser, surface rugueuse, profil aléatoire

1. Introduction

Les mesures précises de la topographie de la surface ont attiré une attention considérable ces dernières années. Quand les aspérités sont de l'ordre de plusieurs des micromètres, les techniques optiques ont pu fournir la possibilité de non destructif sur mesures en ligne de la rugosité de surfaces pendant la fabrication.

Des surfaces rugueuses sont habituellement décrites par les modèles statistiques, la plupart du temps gaussiens, qui sont limitées pour les faibles rugosités [1] (cas du matériau subi un polissage optique). Cependant, cet arrangement n'est plus approprié pour certains cas où les matériaux sont très rugueux telles que des matériaux subi un frisage, tournage, ou moulage. Quelques résultats reliant le champ diffusé à la dimension du diffuseur ont été déjà exhibés dans le cas spécifique des matériaux ont des surfaces données par des faibles rugosités [2]. En cet article, nous présentant une méthode pour rechercher une dimension typique d'une rugosité superficielle au moyen de diffusion de la lumière laser adaptée pour les différentes dimensions du diffuseur.

2. Origine de la rugosité

En mécanique principalement ces irrégularités de surface ou la rugosité sont générées soit par la rugosité modèle qu'épouse la matière coulante au moment du coulage et dont le pas est aléatoire, soit de l'arrachement de la matière par l'outil de coupe sur la surface de la pièce. Dans ce dernier cas, la rugosité a un profil qui dépend du type d'outil de coupe utilisé et un pas pouvant être, selon la vitesse de coupe adoptée, aléatoire ou périodique.

La figure 5 présente des relevés expérimentales avec un rugosimètre pouvant détecter des variations de profil inférieures à 0,1 μm [3].

Un exemple d'une surface rugueuse à profil aléatoire est donné par la Figure 1.

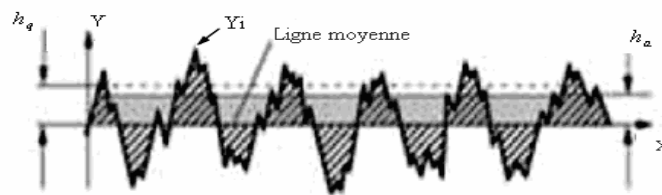


Figure 1: Représentation schématique d'une surface rugueuse.

Les différents points de la surface rugueuse sont définis par leurs côtes Y_i par rapport au niveau moyen (ligne moyenne) de la surface. Celui-ci est défini par la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^N Y_i = 0. \quad (1)$$

Les paramètres les plus utilisés pour caractériser la rugosité [4] sont :

- La hauteur quadratique moyenne h_q (la profondeur): est la moyenne quadratique de toutes les ordonnées du profil de rugosité.

$$h_q = h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2} \quad (2)$$

- La longueur de corrélation (le pas moyen) renseigne sur la distance moyenne séparant deux aspérités voisines.

3. Diffusion d'une onde laser par la rugosité d'une surface

3.1. Eléments théoriques

Les méthodes analytiques, notamment, se basent sur une connaissance *statistique* (et non pas déterministe) de la surface considérée à profil aléatoire. On caractérise alors une surface rugueuse à profil aléatoire par deux termes :

- sa densité de probabilité des hauteurs.
- sa fonction d'autocorrélation des hauteurs.

La densité de probabilité des hauteurs de la surface représente la répartition statistique (ou distribution) des hauteurs de cette surface. Elle est caractérisée par sa valeur moyenne, son écart type, et le type de cette densité (gaussienne, lorentzienne, poisson...).

Habituellement ces surfaces sont décrites par les modèles gaussiens [2.4]. Ce modèle souffre de sérieuse limite. Il est adapté pour des surfaces présentant des faibles rugosités (la hauteur quadratique moyenne très faible devant la longueur d'onde) comme dans le cas du polissage optique. Donc, nous avons opté pour le modèle utilisant la distribution de Poisson des hauteurs de la surface donné par [3]. Ce modèle approxime le profil aléatoire à une distribution statistique du type signal de télégraphe (Figure2).

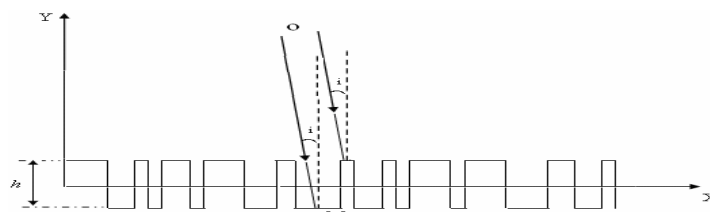


Figure 2 : Modèle aléatoire

Le déphasage engendré sur le front de l'onde incidente en un point M s'écrit :

$$\phi(m) = -\vec{k}_i \cdot O \vec{M} \quad (3)$$

Tous les points ne sont pas à la même hauteur.

La distribution de probabilité du nombre n de transitions sur la longueur L est supposée suivre la loi de Poisson :

$$p(n) = e^{-\mu} \frac{\mu^n}{n!} \quad (4)$$

Où μ est le nombre moyen de transitions de $-\frac{h}{2} \dot{a} + \frac{h}{2}$

La fonction d'autocorrélation du signal spatial s'écrit alors :

$$C(L) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x) \cdot e^{j\phi(x)} [A(x+L) \cdot e^{j\phi(x+L)}]^* dx \quad (5)$$

Où $A(x)$ est une fonction décrivant l'évolution transversale du signal lumineux.

L'estimation de cette fonction d'autocorrélation est :

$$E = \sum_0^{\infty} P(n) \cdot C(L) \quad (6)$$

En explicitant, il vient :

$$E = |A|^2 e^{jkLi} (2a - |L|) \left[1 \cdot \sum_0^{\infty} P(2n) + \frac{e^{j2\phi} + e^{-j2\phi}}{2} \cdot \sum_0^{\infty} P(2n+1) \right] \quad (7)$$

Et le calcul de cette valeur donne :

$$E(L) = \begin{cases} |A|^2 (2a - |L|) \frac{e^{jkLi}}{2} [\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cdot e^{-2\mu |L|}] & \text{pour } |L| \leq 2a \\ 0 & \text{: ailleurs} \end{cases} \quad (8)$$

La densité angulaire de puissance lumineuse diffusée s'écrit sous forme condensée.

$$P_d(i') = F_1 * F_2 \quad (9)$$

L'expression finale est écrite de la manière suivante :

$$P_d(i') = |A|^2 \cos^2 \phi \lambda \frac{\sin^2 [k\alpha(i' + i)]}{[k\alpha(i' + i)]} + |A|^2 \frac{\sin^2 \phi}{\mu} \left[\frac{\sin k\alpha(i' + i)}{k\alpha(i' + i)} \right]^2 * \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi i'}{\lambda \mu} \right)^2} \quad (10)$$

Où :

i' : l'angle de diffusion ou d'observation, i : l'angle d'incidence, et a la section du rayon laser. $\Phi = K \cdot h$ (h est la hauteur quadratique moyenne).

Le premier terme de la formule (10) concerne la diffraction, et le deuxième terme est un produit de convolution de deux fonctions qui correspondent à la diffraction et à la diffusion de la puissance lumineuse.

3.2. Résultats numériques et discussion

Nous présentons maintenant quelques résultats typiques obtenus avec ce nouveau formalisme. Pour vérifier leur validité, nous avons utilisés des simulations numériques basées sur la distribution angulaire de la puissance de la diffusion de la lumière laser.

Pour ces calculs, nous avons utilisés une onde plane d'illumination (laser : $\lambda=0.6328$), sous un angle d'incidence $i = \pi/10rd$.

Le terme de diffusion de l'expression (10) donne l'allure représentée sur la figure 3 du spectre angulaire de la puissance du faisceau diffusé par un profil quelconque en fonction de l'angle d'observation, de pas moyen $\Lambda=40 \mu m$ et d'hauteur quadratique moyenne $h_q = 0.29 \mu m$.

La lumière est diffusée dans tout un demi-espace (de $-\frac{\pi}{2}$ à $\frac{\pi}{2}$). Donc l'énergie est répartie dans une grande zone avec une fraction importante de cette énergie repart vers un observateur situé dans la direction de réflexion.

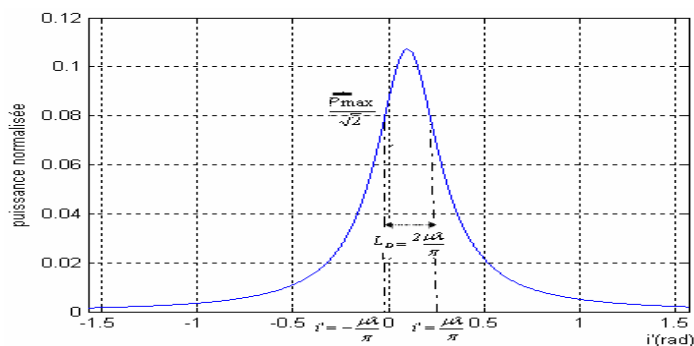


Figure.3 : Répartition angulaire de la puissance de la lumière diffusée par le modèle aléatoire.

Les angles d'observation pour lesquels nous avons une atténuation de $3 db$ de la puissance maximale diffusée sont : $i' = \pm \frac{\mu\lambda}{\pi}$.

Nous en déduisons que la largeur angulaire du flux lumineux diffusé dont l'atténuation de la puissance est inférieure ou égale $3 db$ de la puissance maximale diffusée est : $L_D = \frac{2\mu\lambda}{\pi}$.

Donc, cette largeur L_D , varie en fonction du nombre de transition. C'est-à-dire en fonction du pas moyen de la rugosité Λ , et de longueur d'onde λ , donc il est important d'étudier l'influence des caractéristiques géométriques de la rugosité et de l'onde incidente sur la largeur angulaire du flux lumineux diffusé.

De la formule (10) on peut montrer que :

$$P_d(i') \text{ est maximum lorsque : } \sin^2 \Phi = 1 \Rightarrow \Phi = (2.n + 1) \frac{\pi}{2}$$

$$D'autre pars on a : \Phi = K.h \text{ et } K = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow h = \frac{\Phi \cdot \lambda}{2\pi}, \text{ Il vient alors : } h = (2.n + 1) \cdot \frac{\lambda}{4}$$

Nous pouvons déduire alors, que la puissance de diffusion est d'autant plus grande ou peut atteindre des valeurs maximales que lorsque la hauteur quadratique moyenne de la rugosité est de l'ordre du quart d'onde d'éclairage.

Après, nous montrons l'influence de la longueur de corrélation (le pas moyen) de la rugosité sur la puissance diffusée. Pour différents profils représentés dans fig.6, nous obtenons les

courbes de la figure 4, on peut constater que la largeur angulaire du flux lumineux diffusé augmente par contre la puissance diminue lorsque le pas moyen de la rugosité diminue c'est-à-dire la rugosité est plus fine.

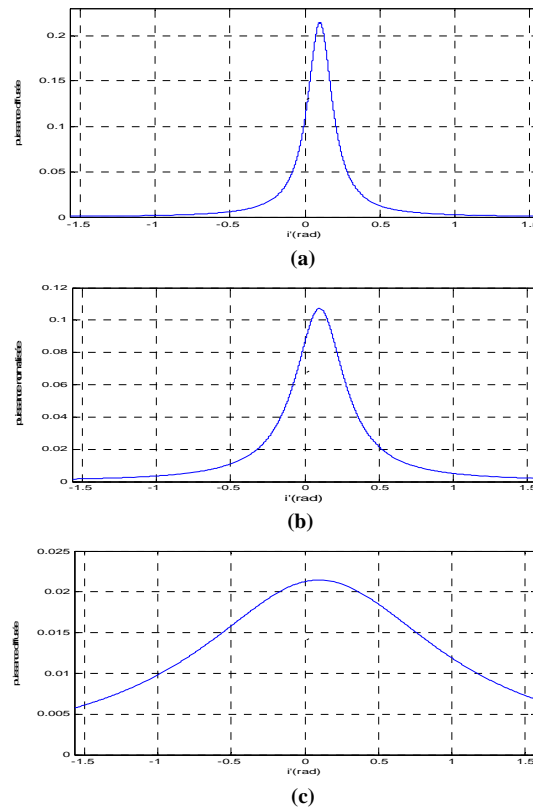


Figure 4 : Répartition angulaire de la puissance de la lumière diffusée par les profils des surfaces obtenues par : a) fraisage ; b) moulage; c) tournage.

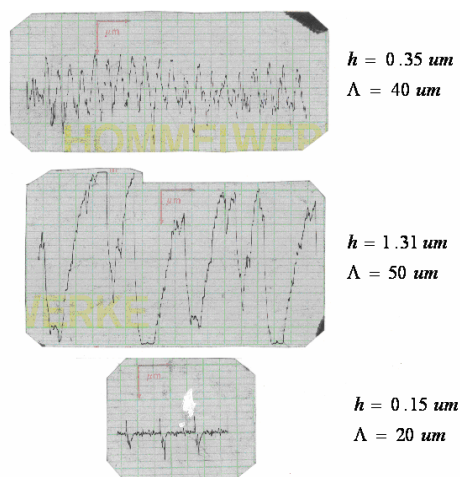


Figure 5 : Relevés expérimentaux de profils de surface [3] obtenus par:
a) moulage, b) fraisage, c) tournage

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons utilisés une nouvelle technique d'approximation au problème de la diffusion par les surfaces rugueux. Elle peut être employée pour des surfaces avec les aspérités et la rugosité sont élevées. Nous avons étudié l'influence de l'état de surface du matériau diélectrique rugueux sur la lumière laser incidente. Nous avons trouvé que cette diffusion est simplement liée aux paramètres de la rugosité de cette surface éclairée (le pas moyen et la hauteur quadratique moyenne) et des paramètres optiques tels que la longueur d'onde et l'angle d'incidence. Donc, l'extraction des caractéristiques de la rugosité des caractéristiques de la lumière diffusée (problème inverse), est possible.

Références

- [1] Guérin, C.A., Scattering on rough surfaces with alpha-stable non-Gaussian height distributions. *Waves in Random Media* 12, 293-306, 2002.
- [2] Zerrouki, Ch., Miserey, Fr., et Pinot, P., répartition angulaire de la lumière diffusée par un échantillon poli du super-alliage cocr20wni (alacrite xsh) ; application a la détermination des paramètres statistiques caractérisent la rugosité superficielle. *Eur. Phys. J. AP* 1, 253-259, 1998.
- [3] Saouchi. K., Détection et digitalisation des objets tridimensionnels analysés par faisceau laser, *thèse 3^{ème} cycle*, valenciennes, France, 1984.
- [4] Bennett, J.M., et Mattsson, L., Introduction to surface roughness and scattering, *Optical Society of America*, Washington, 1-112, 1989.