

MESURE DE LA MICRORUGOSITÉ DES SURFACES POLIES DU VERRE OPTIQUE PAR INTERFÉROMÉTRIE À DÉCALAGE DE PHASE

Aïssa MANALLAH, Mohamed BOUAFIA et Abdelhalim BENCHEIKH
*Laboratoire d'Optique Appliquée, Département d'Optique et de Mécanique de Précision,
Université Ferhat Abbas de Sétif, 19000 Sétif, Algérie*
E-mail : manallah_aissa@yahoo.fr

RÉSUMÉ : L'interférométrie optique est une technique d'analyse des surfaces utilisant le phénomène d'interférence des ondes lumineuses pour faire des mesures extrêmement précises. Le contraste interférentiel transforme la différence du chemin optique imperceptible à l'œil nu en différences dans l'intensité lumineuse qui est fonction des hauteurs des aspérités de la surface examinée. La détection des variations des irrégularités se fait par la quantification des franges d'interférences.

Un logiciel adéquat d'analyse des franges consiste à appliquer un algorithme de décalage de phase à « quatre pas » pour déterminer la distribution spatiale de la phase. La rugosité est le résultat d'un calcul statistique sur le profil de la surface déterminé en considérant la différence du chemin optique, le déphasage et la longueur d'onde du laser utilisé.

MOTS-CLÉS : contrôle non destructif, métrologie optique, rugosité de surface, interférométrie, décalage de phase

1. Introduction

Les méthodes optiques permettent de contrôler et de quantifier en temps réel, sans contact et avec rapidité et précision, plusieurs paramètres tels que la forme, la rugosité et le profil de surfaces. La cohérence et la forte intensité lumineuse des lasers d'une part et les outils informatiques d'autre part, ont permis de développer la métrologie optique.

En métrologie optique, outre les méthodes statiques et photographiques, les méthodes interférométriques sont les plus répandues, et particulièrement la technique de décalage de phase (PSM: *Phase Shifting Method*). Cette technique est basée sur l'exploitation de la phase codée (interférogramme) en utilisant un interféromètre associé à des algorithmes pour l'analyse des images des franges.

Divers dispositifs interférentiels ont été développés [1]-[2]-[3] afin de pouvoir capter et analyser les franges d'interférences et les appliquer à des fins pratiques dans plusieurs domaines de contrôle nécessitant une haute précision, tels que :

- La métrologie dimensionnelle (micro déplacements, petites épaisseurs et petits angles).
- Le contrôle de qualité des surfaces, les défauts de forme et les déformations.
- L'holographie...

2. État de surface et rugosité

Rien n'est plus riche en informations qu'une surface où elle joue un rôle déterminant sur les propriétés géométriques, mécaniques, thermiques, physico-chimiques, électroniques et optiques des matériaux.

Les différents points d'une surface rugueuse sont définis par leurs cotes Z_i par rapport au niveau moyen de la surface. Celui-ci est défini par la relation suivante:

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

Le paramètre le plus utilisé pour caractériser la rugosité est la hauteur quadratique moyenne δ (notée aussi R_q) :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2} \quad (2)$$

3. Le Décalage de phase

La technique de décalage de phase [3]-[4]-[5] est une méthode très utilisée pour analyser la forme et le profil d'une surface. Le principe est basé sur la différence de marche entre le faisceau de référence et le faisceau objet. L'interférence des deux faisceaux donne naissance à une figure de franges claires et obscures appelée interférogramme, cela nécessite évidemment l'utilisation d'un interféromètre à deux ondes d'intensités respectives I_1 et I_2 [3]. La répartition de l'intensité de l'image d'interférences sur la surface du capteur est donnée par la relation suivante:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (4)$$

Le déphasage $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ entre les deux ondes est dû à la différence des chemins optiques. Cette différence, notée δl , est liée au déphasage φ par :

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta l}{\lambda} \quad (5)$$

La différence d'éclairement entre les franges claires et obscures est exprimée, dans le cas d'interférence à deux ondes d'intensités I_1 et I_2 , par le contraste des franges défini par:

$$\gamma = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (6)$$

L'intensité $I(x,y)$ à la sortie de l'interféromètre est modulée en introduisant un décalage de phase réalisée à l'aide d'un translateur piézoélectrique PZT. En chaque point, la phase est calculée à partir de quelques valeurs d'intensité correspondant à des décalages de phase connus $\delta\varphi = (4\pi/\lambda) \cdot d$, où d est le déplacement du faisceau de référence et λ la longueur d'onde. Il existe plusieurs algorithmes de calcul de la phase, ils diffèrent par le nombre d'images interférométriques utilisées et par l'incrément de phase $\delta\varphi$ introduit.

Dans ce travail, un algorithme à quatre pas est appliqué, il s'agit d'enregistrer quatre images interférométriques avec un incrément de phase de $\pi/2$. Les intensités d'interférences sont données par :

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0 [1 + \gamma(x, y) \cdot \cos \varphi(x, y)] \\
 I_2(x, y) &= I_0 [1 + \gamma(x, y) \cdot \cos \varphi(x, y) + \pi/2] \\
 I_3(x, y) &= I_0 [1 + \gamma(x, y) \cdot \cos \varphi(x, y) + \pi] \\
 I_4(x, y) &= I_0 [1 + \gamma(x, y) \cdot \cos \varphi(x, y) + 3\pi/2]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

I_0 est l'intensité incidente (intensité de la source laser) et $\gamma(x,y)$ est le contraste des franges. Les quatre images interférométriques contiennent les informations sur la distribution spatiale de la phase $\varphi(x,y)$:

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}
 \tag{8}$$

Ainsi la forme et la topographie de la surface sont déterminées à partir de (5), par la relation:

$$Z(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi(x, y)
 \tag{9}$$

4. Travail expérimental

Le travail expérimental consiste à appliquer l'interféromètre de Mac-Zehnder pour l'évaluation des déformations (rugosité) des surfaces en combinant numériquement les images des franges (interférogrammes).

Nous présentons une description du montage optique, ensuite nous exploitons les images interférométriques obtenues par la technique de décalage de phase en utilisant le logiciel IDEA (*Interferometrical Data Evaluation Algorithms*) et le logiciel Image-Pro Plus pour le traitement numérique des images.

4. 1. Montage

Sur la figure 1, un faisceau laser He-Ne de longueur d'onde égale à 632,8 nm constitue une source de lumière monochromatique cohérente émettant avec une puissance de 30 mW. Le faisceau, filtré spatialement et élargi par un objectif de microscope (20/0.5) et une lentille biconvexe, est divisé en deux faisceaux d'égale intensités par le cube séparateur CS1. Le premier faisceau, dit objet, éclaire la surface diffusante de l'échantillon sous incidence de 45°. L'échantillon est un verre optique de type Flint LF7 et d'épaisseur égale à 5 mm ayant subi un polissage mécanique.

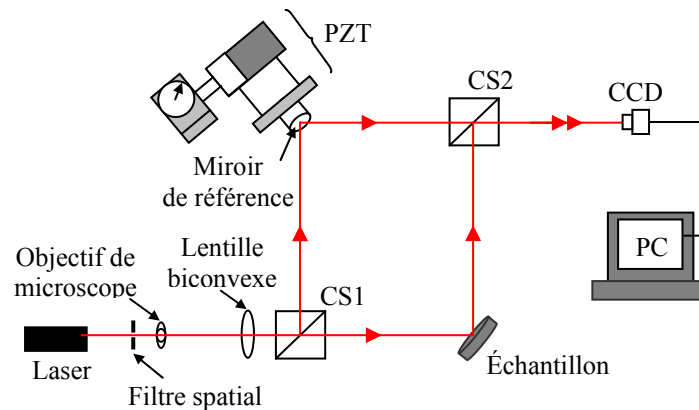


Fig. 1. Montage expérimental; interféromètre de Mac-Zehnder

Le deuxième faisceau, dit de référence, tombe également à 45° sur le miroir porté par le translateur piézo-électrique PZT.

Après réflexion, les deux faisceaux se recombinaient par le deuxième cube séparateur CS2, l'image d'interférence des deux ondes (objet et référence) est captée par la camera CCD reliée au PC par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition de type Matrox.

Pour varier la différence de phase entre les deux faisceaux, on fait changer la tension aux bornes du PZT. Son étalonnage est alors nécessaire pour introduire des incréments de phase corrects pour la prise des interférogrammes relatifs aux décalages de phase correspondants.

4. 2. Étalonnage du PZT

Le PZT est une céramique piézo-électrique de forme cylindrique caractérisée par une grande sensibilité à la tension électrique, il permet de commander et de contrôler la phase de l'onde de référence.

Le PZT est placé sur l'un des bras de l'interféromètre. Les bornes sont branchées à un générateur de tension lié à son tour à un multimètre pour contrôler les tensions appliquées. Le PZT se déplace lorsque la tension appliquée à ses bornes augmente. On règle l'interféromètre de façon à obtenir des franges en absence des vibrations. Les franges resteront fixes sur l'objectif de la camera CCD, où une empreinte sert de référence. L'image interférométrique contient des franges constructives (claires) qui correspondent à $\varphi=2k\pi$ et des franges destructives (obscurcies) qui correspondent à $\varphi=(2k+1)\pi$. Les franges constructives sont utilisées pour l'étalonnage.

A l'aide du générateur de tension, on varie la tension jusqu'au défilement complet d'une frange qui correspond à un déphasage de 2π . Les résultats de l'étalonnage sont montrés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Étalonnage du PZT

Déphasage (°)	0	90	180	270
Tension (V)	1,25	2,5	5	10

5. Résultats

Les aspérités de la surface du verre sont analysées; Quatre images correspondant à quatre décalages de phase dont les angles sont $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ sont enregistrées. La figure 2 illustre les images obtenues, pour chaque décalage on a un interférogramme avec la distribution d'intensité correspondante.

Pour calculer la phase qui nous renseigne sur les aspérités de la surface, on applique l'algorithme de décalage à "quatre pas" en utilisant le logiciel IDEA développé pour l'évaluation de l'information de phase.

Le résultat de l'opération est une image de distribution spatiale de la phase, mais cette distribution est discontinue et est définie modulo 2π , elle dite phase enroulée (figure 3). Il faut donc procéder au déroulage (ou dépliement) de la phase pour représenter le "mesurande" physique (déformation, rugosité...). Dérouler la phase signifie supprimer les sauts de 2π présents en ajoutant ou en supprimant localement le multiple de 2π adéquat [6].

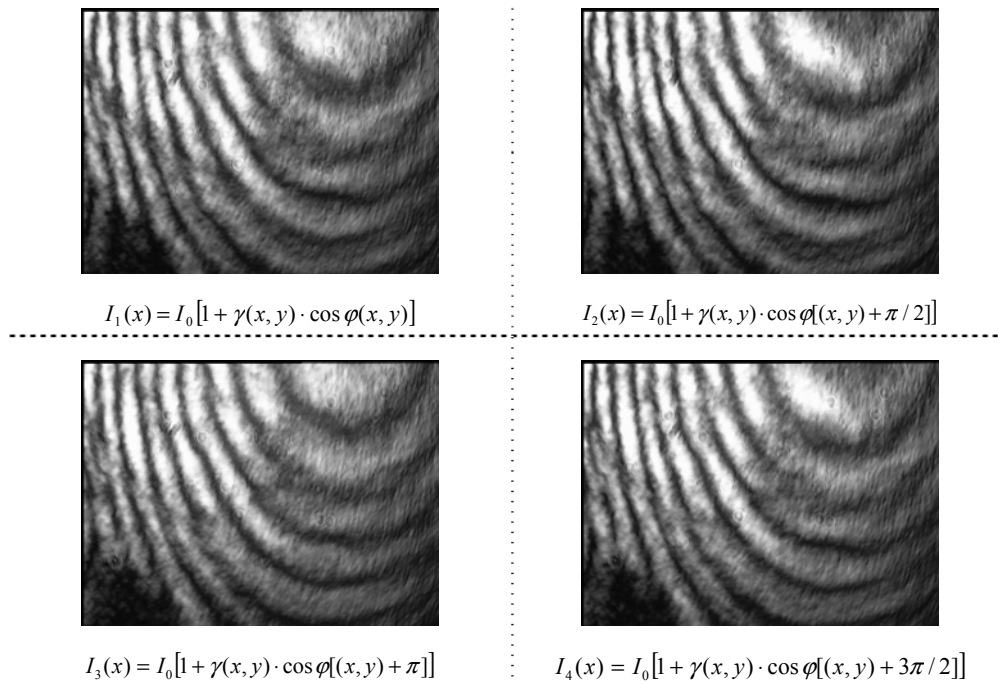


Fig. 2. Interférogrammes obtenus par la technique de décalage de phase à "quatre pas"

L'image est filtrée pour minimiser le bruit au moyen d'un filtre passe-bas. Ainsi on peut tracer le profil représentant une distribution linéaire de la phase.

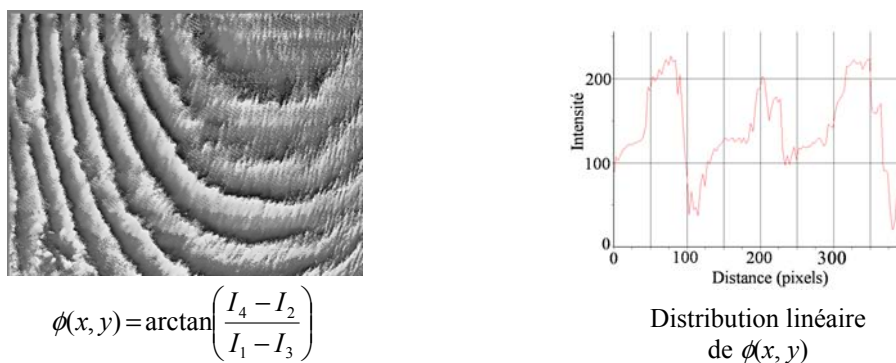


Fig.3. Distribution de la phase enroulée

Le résultat du processus de déroulage de la phase est illustré dans la figure 4.

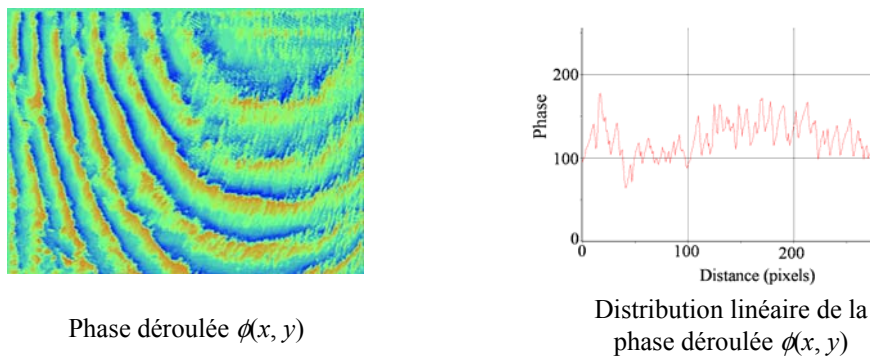


Fig. 4. Distribution de la phase déroulée

Un calcul statistique sur le profil donne, selon la relation (2), la rugosité de la surface. Pour transformer la distribution de phase en différence de marche $Z(x)$, on utilise la relation (9). Le profil de la surface, qui représente la distribution des amplitudes de ses irrégularités, est représenté par la figure 5. L'axe des abscisses est donné en nombre de pixels.

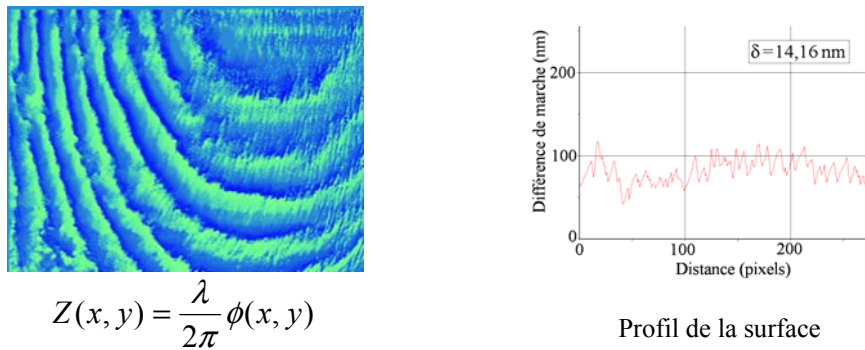


Fig. 5. Différence de marche en fonction de la coordonnée transversale (en pixels)

6. Conclusion

Le présent travail nous a permis de contribuer expérimentalement à la mise en œuvre d'une technique de contrôle des microdéformations des surfaces, en l'occurrence la microrugosité. Les résultats ont été obtenus en associant la technique de décalage de phase à l'imagerie interférométrique. Les mesures sont de l'ordre du nanomètre.

Références

- [1] M. Born and E. Wolf, "*Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction*", 7th ed., Pergamon, London 1999.
- [2] P. Jacquot, "*Techniques speckle et applications*", 6ème Colloque Francophone, méthodes et techniques optiques pour l'industrie, Marseille, France 21-25 novembre 2005.
- [3] D. Malacara, M. Servin and Z. Malacara, "*Interferogram analysis of optical testing*", Marcel Dekker, New York 1999.
- [4] H. Fritz, "*über ein interferenzmikroskop ohne körperliche referenzfläche unter besonderer beachtung der genauigkeit der automatischen Interferenz bildauswertung*", Dissertation, FriedrichShiller-Universität Jena, Allemagne 1991.
- [5] P. Hariharan, "*Optical interferometry*", 2nd ed., Elsevier Academic Press, 2003.
- [6] A. Manallah, "*Analyse et caractérisation des surfaces et interfaces des matériaux diélectriques, métalliques et semi-conducteurs*", Thèse de doctorat d'état, Université de Sétif, 2007.