# PROFILOMÈTRE CONFOCAL À BALAYAGE LASER

M. Chikh-Bled, B. Chikh-Bled, F. Benkhenafou

Université Abou Bakr Belkaïd, Département de Physique, Faculté des Sciences, B.P 119, 13000 Tlemcen, Algérie photo68@caramail.com

(Received 20 April 2000 Accepted 8 March 2002)

## RESUME

Le système proposé utilise un microscope confocal travaillant en réflexion auquel on a pratiqué les adaptations nécessaires afin de restituer le profil tridimensionnel de la surface analysée (Hamilton and Wilson, 1982).

Contrairement à la microscopie conventionnelle ou l'objet champ est uniformément éclairé, en microscopie optique à balayage, chaque point objet est illuminé par l'image d'un point lumineux formé par l'objectif du microscope, donc par une tache dont la dimension est du même ordre que la limite de résolution. Le flux lumineux transmis ou réfléchi à chaque instant par un seul point de l'objet est recueilli par un récepteur unique, fournissant un signal dépendant du niveau photométrique au point considéré. C'est là un premier avantage sur la microscopie conventionnelle où à chaque point du champ correspond un élément photosensible du récepteur (rétine de l'œil, émulsion photographique, capteur C.C.D), chacun d'eux pouvant être de sensibilité différente à une même excitation ou de résolution différente dans le champ.

Parmi les avantages et l'intérêt d'une telle technique on peut citer :

- La possibilité d'analyser un objet suivant des coupes très fines pour des plans des mises au point rapprochés permet une reconstitution en trois dimensions et c'est tout l'avantage essentiel de ce type de microscopie.
- L'amélioration du contraste et de la profondeur de champ.
- La résolution latérale bien meilleure que celle de la microscopie classique.

Mots clés : profilométrie optique, microscopie interférentielle, microscopie confocale

## ABSTRACT

The proposed system uses a confocal microscope working in reflexion and adapted in order to restore the three-dimensional profile of the analyzed surface (Hamilton and Wilson, 1982).

In contrast to conventional microscopy where the object is uniformly lightened, in optical scanning microscopy, each point object is illuminated by the image of a luminous point formed by the objective of the microscope; therefore by a spot whose dimension is of the same order as the limit of resolution. The luminous flow transmitted or reflected at every moment by only one point of the object is collected by a single receiver, providing a signal which is dependent upon the photometric level to the point considered. This is a first advantage on conventional microscopy where to each point of the field corresponds a photosensitive element of the receiver (retina of the eye, photographic emulsion, sensor C.C.D), each one being able to be of different sensitivity to the same excitation or of different resolution in the field. Some of the advantages of such a technique are:

- the possibility of analyzing an object along very fine cuts for closer developments allowing for a reconstitution in three-dimensions.
- improvement of the contrast and depth of the field.
- a far better side resolution than in traditional microscopy.

Keywords : optical profilometry, interferential microscopy, confocal microscopy

#### PRINCIPE

Seuls les microscopes travaillant en réflexion sont utilisés en profilométrie. La conception instrumentale exige la conjugaison des deux trous source et récepteur de dimensions suffisantes dans l'espace intermédiaire (Hamilton and Wilson, 1982 a; b; Wilson and Hamilton, 1984). Dans ce cas, l'objet peut être balayé par un faisceau laser suivant le schéma de la Figure 1 à condition que le faisceau réfléchi soit ramené dans une direction fixe en retraversant le double système déflecteur.



Figure 1. Principe de la profilométrie par microscopie confocale.

Le bon fonctionnement d'un tel système exige une mise au point correcte sur l'objet à analyser afin que toute la lumière réfléchie soit détectée ponctuellement. La réponse en Z augmente lorsque la longueur d'onde est faible et que l'ouverture numérique est grande.

Le déplacement de l'objet le long de l'axe optique Z fournit une réponse en intensité du détecteur dont le maximum correspond exactement au plan de mise au point.

D'un point de mesure à un autre, le déplacement longitudinal nécessaire pour conserver le maximum de lumière correspond à la variation de hauteur entre les deux points. C'est le principe même de la profilométrie par microscopie confocale.

La représentation tridimensionnelle de la surface analysée est obtenue grâce à la mesure des maximums d'intensité recueillis en chaque point par balayage latéral suivant les directions x et y, ainsi que par déplacement longitudinal de l'objet le long de l'axe optique.

## PRESENTATION DU MICROSCOPE CONFOCAL A BALAYAGE LASER

#### Description du système optique

Le système LASERTEC (Japon) qu'on a eu l'occasion d'utiliser est un microscope confocal à déflecteur acousto-optique (Lasertec, 1992). Les éléments qui composent un tel système ne sont pas connus avec précision, néanmoins on a essayé de fournir le maximum d'informations. Le schéma de principe est illustré par la Figure 2.

Globalement, il s'agit d'un microscope traditionnel travaillant en réflexion auquel on a intégré une unité d'émission et une unité de détection. La lumière est émise par un laser He-Ne polarisé de longueur d'onde 633 nm, peu divergent, et de faible puissance (de l'ordre du milliwatt), suffisante pour que sa focalisation dans le plan objet crée un éclairement énergétique qui ne soit pas trop intense. Le choix d'une telle source fait qu'on peut la considérer comme ponctuelle, où les aberrations chromatiques sont nettement atténuées. Les lentilles  $L_1$  et  $L_2$  forment un système afocal qui élargit le faisceau.

La lumière d'éclairage est focalisée sur le trou source  $T_S$  conjugué du plan objet, puis de nouveau collimatée avec un diamètre compatible avec celui de la pupille de sortie du microscope et défléchie angulairement, suivant deux rotations perpendiculaires d'axes contenus dans des plans pupillaires, par un système que nous décrirons par la suite.

Après traversée du microscope, la lumière réfléchie par l'objet suit le même trajet inverse avant d'être focalisée sur le trou récepteur  $T_r$  conjugué du trou source puis détectée par une barrette CCD linéaire de 1000 pixels de dimensions 14 µm x 14 µm.

L'instrument est associé à des éléments périphériques de caractéristiques compatibles avec celles du balayage, permettant son pilotage, la numérisation du signal, l'adressage des données, leur traitement ou leur stockage.

Pour assurer le balayage, deux systèmes déflecteurs assurant le balayage ligne (X) et le balayage (Y) sont nécessaires. L'emploi d'un déflecteur acousto-optique (X) pour le balayage ligne est un composant électro-optique qui permet, grâce à un signal électrique de fréquence et d'amplitude donnés, de faire varier l'amplitude et la direction du faisceau laser. Un transducteur solidaire du cristal transforme le signal électrique en une onde acoustique dont les variations produisent un changement périodique de densité et par suite d'indice. Ceci a pour effet de créer un réseau de phase en mouvement faisant varier l'angle de déflexion du faisceau. La fréquence de balayage peut atteindre celle de la télévision (environ 60  $\mu$ s). Le balayage (Y) est assuré par un miroir tournant dont la fréquence de rotation est assez faible

(un cycle complet correspond à une image complète, qui dure environ 33 ms). Entre ce miroir et l'objectif de microscope, la lumière traverse deux lentilles de relais  $L_4$  et  $L_5$  ainsi qu'une lame quart d'onde  $\lambda / 4$ . Celle-ci a pour rôle de faire tourner le plan de polarisation de 90° afin que la lame séparatrice soit transparente pour la lumière réfléchie avant d'être focalisée par la lentille  $L_3$  qui précède le photodétecteur.

Le microscope est muni de cinq objectifs de grandissements respectifs, X10, 20, 50, 80, et 100. Pour un grandissement commercial G=X10, le champ observé sera de  $1.15 \times 0.9 \text{ mm}^2$ .



Figure 2. Système optique du microscope confocal.

## Principe de fonctionnement

La Figure 3 montre le microscope confocal et les différents accessoires qui le composent.

L'objet à analyser est placé sur une platine mobile dont le déplacement est assuré par un moteur continu commandé électroniquement. Le photodétecteur constitué d'une barrette CCD couplée à une carte Matrox d'acquisition permet d'acquérir des images de 1024 x 1024 codées sur 256 niveaux de gris avec une grande rapidité grâce aux processeurs qui lui



sont intégrés. La visualisation des images de texture et de profil se fait en temps réel sur un moniteur vidéo à haute résolution.

Figure 3. Le microscope confocal et ses accessoires.

La procédure pour effectuer une mesure consiste à placer l'échantillon sur la platine mobile, et de faire une mise au point d'abord manuelle pour tous les points se trouvant en dessous de cette position. Celle-ci est repérée par le système comme référence basse pour être ensuite mémorisée. On réitère la même opération avec les points se trouvant au dessus du plan de mise au point ; on mémorise la référence haute. Lorsque les deux références sont enregistrées, le système de commande commence la mesure en déplaçant l'échantillon automatiquement de la référence haute à la référence basse tout en mémorisant les positions de la platine correspondant aux maximums d'intensités détectées. A la fin du balayage on dispose de deux images de l'échantillon :

• Une première image de texture correspondant aux intensités maximales réfléchies par tous les points de la surface. Cette image correspond à la profondeur de champ de l'objectif utilisé et couvrant la hauteur totale de rugosité. C'est pratiquement la même image obtenue avec un microscope classique avec toutefois une meilleure mise au point.

• Une deuxième image fournit le profil de l'échantillon codé sur 256 niveaux de discrétisation. Ainsi le profil Z(x, y) de l'échantillon analysé est récupéré sous la forme d'une image P(i, j) codée sur 256 niveaux. Les indices lignes et colonnes des pixels images sont reliés aux dimensions latérales du champ analysé par des coefficients proportionnels au grandissement de l'objectif de microscope. Le niveau de gris P(i, j) de chaque pixel code la hauteur Z(x, y) du point correspondant par la relation suivante :

$$p(i, j)=256 \left[Z(x, y) - Z_{min}\right] / \left(Z_{max} - Z_{min}\right)$$

où  $(Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}})$  est l'excursion maximale de l'échantillon imposée par le manipulateur avant la procédure d'acquisition et légèrement supérieure à la profondeur du champ inspectée.

## Performances du système et résultats expérimentaux

Sachant que la profondeur de champ du microscope est la distance maximale de deux points de l'axe tels que leurs images soient toutes deux acceptables, le système décrit permet de repérer avec une excellente précision la position d'un objet sur l'axe optique. Il donne des images relatives à des tranches de l'objet. L'analyse d'un objet suivant 256 coupes à la fréquence de 30 images par seconde dure environ 9 secondes (256/30=8.53 s).

L'un des inconvénients majeur est dû à la nature cohérente du Laser qui éclaire le microscope produisant ainsi du speckle. Lorsque l'ouverture numérique augmente, la taille des grains de speckle augmente influant systématiquement sur la détection du signal.

La sensibilité longitudinale augmente avec l'ouverture numérique, et une résolution de 0.1 µm peut facilement être obtenue avec ce type d'appareil.

On a cherché à réaliser le profil de deux échantillons mis à notre disposition : le premier est un réseau périodique de pas 30  $\mu$ m et de hauteur 1 $\mu$ m, l'autre est un échantillon de silicium. La figure 4 montre leurs topographies. Dans les deux cas les profils ont été obtenus avec un objectif de grandissement G=X20, et la surface analysée est de 575 x 450  $\mu$ m<sup>2</sup>.



Figure 4. Topographies des surfaces analysées. En haut : Composé en silicium En bas : Réseau gravé

94

## CONCLUSION

La technique proposée permet la reconstruction d'un objet en trois dimensions. Cette capacité d'analyse suivant des coupes très fines pour des plans de mise au point rapprochés constitue l'avantage majeur de ce système. Bien que le principe du microscope confocal à balayage soit simple et connu depuis plusieurs années, les dispositifs commerciaux développés et largement répandus en contrôle non destructif doivent leurs nouvelles performances aux systèmes d'acquisition et de traitement d'images. La résolution latérale est limitée par la taille de la tache de focalisation diffractée par l'objectif d'analyse qui est de l'ordre de 0.25 microns, tandis que la résolution longitudinale est d'environ 0.1 microns. Les récents développements de ce type de microscopie font intervenir des masques de trous sources afin d'augmenter le rendement lumineux (Mc Entee, 1996; Tiziani and Uhde, 1994). Mais le balayage longitudinal des différents plans de mise au point limite le temps d'acquisition. La combinaison du balayage latéral et d'un codage chromatique peut être une solution efficace pour que l'acquisition de tous les plans se fasse en même temps sans faire intervenir de balayage mécanique suivant l'axe optique.

## REFERENCES

- Hamilton, D. K. and Wilson, T. 1982 a. Surface profile measurement using confocal microscope. J. Applied. Physics, 53(7): 5320-5322.
- Hamilton, D. K. and Wilson, T. 1982 b. Three- dimensional measurement using the confocal scanning microscope. Appl. Physics. B, B27(4): 211-213.
- LASERTEC, Japon. 1992. Confocal laser scanning microscope 1 LM21. Operation manual.
- McEntee, J. 1996. Encoded pixels enhance microscope's 3-D images. *Optics and Laser Europe*. Reports. Issue 32, pp. 17-23.
- Tiziani, H. T. and Uhde, H. M. 1994. Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy. *Applied Optics*, 33(10): 1838-1843.
- Wilson, T. and Hamilton, D. K. 1984. Difference confocal scanning microscopy. Opt. Acta, (31): 452-465.