HAL open science

Mesure de champs de déplacements pour des MEMS

Fabien Amiot, Jean-Paul Roger, François Hild

To cite this version:

Fabien Amiot, Jean-Paul Roger, François Hild. Mesure de champs de déplacements pour des MEMS. 17e Congrès français de mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-04262523

HAL Id: hal-04262523

https://hal.science/hal-04262523v1

Submitted on 27 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesure de champs de déplacements pour des MEMS

Fabien Amiot,[1,2] Jean Paul Roger,[1] François Hild[2]

[1]*Laboratoire d'Optique Physique, ESPCI / CNRS-UPR A0005*
10 rue Vauquelin, 75005 Paris
[2]*LMT-Cachan, ENS de Cachan / CNRS-UMR 8535 / Université Paris 6*
61 avenue du président Wilson, 94235 Cachan Cedex
amiot@optique.espci.fr

Résumé :

On présente un dispositif expérimental permettant la mesure de champs de déplacements plan et hors-plan de surfaces observées en réflexion. Il est basé sur un interféromètre de type Nomarski que l'on utilise avec deux prismes de Wollaston introduisant des décalages différents. La topographie de la surface peut être alors reconstruite et partagée en surface moyenne et rugosité. Le champ de déplacement hors-plan est obtenu par différence des surfaces moyennes, alors que le champ de déplacement plan est obtenu par intercorrélation de la rugosité. Ce dispositif permet la mesure de champs de déplacements à l'échelle du micromètre, et est donc adapté à la mesure de champs de déplacements d'objets micro-mécaniques.

Abstract :

An experimental set-up that allows one to measure in-plane and out-of-plane displacement fields of surfaces in reflection microscopy is presented. This set-up is based upon a Nomarski shear-interferometer, which is used with two different Wollaston prisms. The real topography of the object is deduced and divided into mean surface and roughness. The out-of-plane displacement field is obtained by difference of mean surfaces, while the in-plane displacement field is determined from the cross-correlation of the roughness profile. This set-up is then suitable to measure displacement fields of MEMS.

Mots-clefs :

méthode optique de mesure de champ ; MEMS ; imagerie interférométrique

1 Introduction

Le développement de techniques de lithographie de plus en plus performantes a joué un rôle important dans la multiplication des géométries d'objets mécaniques de dimensions réduites (de l'ordre du micromètre) destinés à des applications micro-capteurs ou micro-actionneurs (MEMS : Micro-Electro-Mechanical-Systems), fabriqués en grande quantité [1]. Ces objets se caractérisent par un rapport surface/volume significativement plus élevé que pour des objets macroscopiques. Cette particularité implique que le comportement mécanique de ces MEMS est dominé par des phénomènes de surface plutôt que de volume, ce qui en fait, potentiellement, des capteurs performants en terme de sensibilité à leur environnement [2]. Parallèlement au développement des moyens de fabrication, de nouveaux outils doivent être mis en place pour pouvoir étudier le comportement mécanique de ces objets. En premier lieu, cela nécessite une mesure de quantités cinématiques suffisamment résolues spatialement. C'est le cas, par exemple, lorsque l'on cherche à modéliser les effets mécaniques induits par l'hybridation d'oligonucléotides sur des MEMS [2]. Dans ce cas, les temps caractéristiques de réaction interdisent l'utilisation d'une méthode point par point pour détecter des effets hétérogènes. On a donc conçu un outil d'imagerie, permettant la mesure du champ de déplacement d'une surface à l'échelle

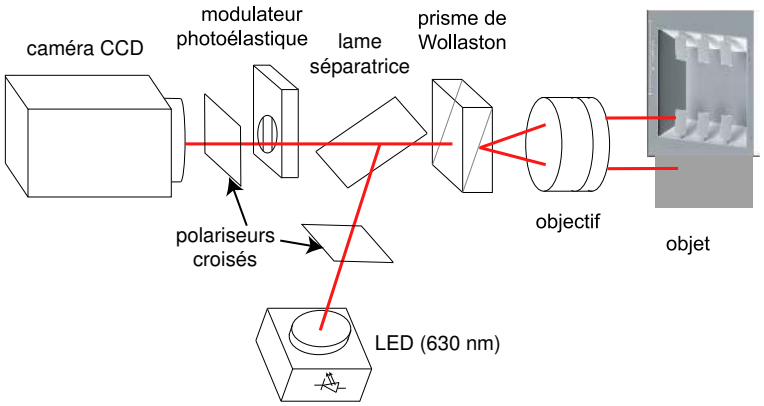

FIG. 1 – *Interféromètre de Nomarski.*

micrométrique. L'instrument proposé est basé sur un interféromètre de Nomarski, utilisé avec deux prismes de Wollaston. Les algorithmes utilisés pour traiter ensuite les images obtenues permettent d'en déduire les champs de déplacement, plan et hors-plan.

2 L'interféromètre de Nomarski à intégration de phase

2.1 Dispositif

Le dispositif de microscopie interférentielle utilisé est celui proposé par Gleyzes *et al.* [3] et présenté sur la figure 1. Une diode électro-luminescente (DEL, $\lambda = 630$ nm) éclaire au travers d'un polariseur une lame séparatrice. Le faisceau arrive alors sous incidence normale sur le prisme de Wollaston. Le faisceau réfléchi par la lame est polarisé à 45° des axes propres du prisme de Wollaston. Celui-ci transmet alors deux faisceaux formant un petit angle. Ces faisceaux, polarisés orthogonalement selon les axes du prisme de Wollaston, sont focalisés à la surface de l'échantillon à l'aide d'un objectif de microscope. Après réflexion sur l'objet, les deux faisceaux polarisés se recombinent dans le prisme avant de traverser la lame séparatrice puis un modulateur photo-élastique en silice, dont les axes sont parallèles à ceux du prisme de Wollaston. Ce modulateur, alimenté en tension sinusoïdale, impose un déphasage variable entre les deux directions de polarisation. Le faisceau traverse un analyseur, dont les axes sont à 45° de ceux du modulateur, et à 90° du premier polariseur. On réalise ainsi l'interférence entre deux topographies de la surface décalées d'une valeur d introduite par le prisme de Wollaston. La figure d'interférences obtenue au foyer de la lentille tube est recueillie sur un capteur CCD. La fréquence de modulation est la fréquence de résonance mécanique du modulateur, soit $50{,}3$ kHz.

2.2 Technique d'intégration de phase

Formellement, le flux reçu par un pixel (repéré par ses coordonnées (l,m) sur la matrice CCD) peut se mettre sous la forme :

$$I(t) = I_0 + A\cos[\phi(l,m) + \psi(t)], \tag{1}$$

où $\phi(l,m)$, la grandeur à déterminer, représente la phase optique introduite par l'échantillon et le prisme de Wollaston. La modulation de phase optique introduite par le modulateur photo-

élastique s'écrit :

$$\psi(t) = \psi_0 \sin(2\pi f t + \theta). \tag{2}$$

Les angles ψ_0 et θ sont deux paramètres que l'on peut choisir de manière *a priori* quelconque. La procédure d'extraction de ϕ est alors la suivante : si l'on appelle $T = 1/f$ la période de la modulation, on acquiert 4 images de la surface pendant la période T, de sorte que chaque image soit le résultat de l'intégration du signal pendant un quart de période. On obtient quatre images E_p, pour $p = 1,2,3,4$:

$$E_p = \int_{\frac{(p-1)T}{4}}^{\frac{pT}{4}} I(t)\mathrm{d}t. \tag{3}$$

On montre alors [4] qu'il existe un couple (ψ_0,θ) qui permet d'en déduire le déphasage ϕ avec une sensibilité optimale :

$$\tan[\phi(l,m)] = \frac{E_1 - E_2 - E_3 + E_4}{E_1 - E_2 + E_3 - E_4}. \tag{4}$$

2.3 Topographie différentielle

Le prisme de Wollaston est placé de sorte que le déphasage introduit soit uniforme dans le champ d'observation. Si, d'autre part, la surface observée a un comportement homogène en réflexion, on peut déduire la topographie différentielle $S(l,m)$ de l'image de phase $\phi(l,m)$ après dépliement :

$$S(l,m) = \frac{\lambda\phi(l,m)}{4\pi}. \tag{5}$$

Les composants sont ajustés afin que la direction du décalage introduit par le prisme de Wollaston soit parallèle à une direction du capteur CCD (*e.g.,* l). La reconstruction de la topographie est formellement simplifiée en opérant dans l'espace de Fourier. L'information recueillie est discrète, de sorte que la transformée de Fourier rapide à une dimension (TFR) $\tilde{F}$ de la topographie $f(l,m)$ est donnée par :

$$\tilde{F}(k,m) = \sum_{l=1}^{N} f(l,m) \exp\left[-2j\pi\frac{(k-1)(l-1)}{N}\right]. \tag{6}$$

Par conséquent, si l'on appelle d le décalage introduit en pixel suivant la première coordonnée, la TFR $\tilde{S}$ de la topographie différentielle $S(l,m)$ issue de la topographie $f(l,m)$ avec $l \in \{1,\ldots N\}$ est donnée par :

$$\tilde{S}(k,m) = 2j\tilde{F}(k,m)\sin\left[\pi d\frac{(k-1)}{N}\right] = \tilde{F}(k,m)\tilde{H}(k,m). \tag{7}$$

Les fréquences spatiales absentes de l'image observée correspondent aux zéros de la fonction de transfert $\tilde{H}(k,m)$ et ne dépendent que du décalage introduit. Ces fréquences spatiales absentes interdisent une détermination directe de $\tilde{F}(k,m)$ à partir de $\tilde{S}(k,m)$: le problème est mal-posé au sens de Hadamard. L'utilisation d'un second décalage permet d'obtenir les informations manquantes.

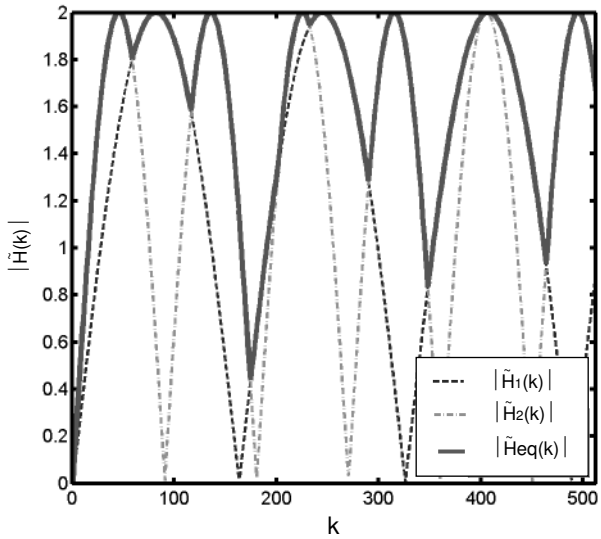

FIG. 2 – *Norme de la fonction de transfert pour deux systèmes avec deux décalages différents et pour le système équivalent.*

3 Interférométrie à deux décalages

3.1 Principe

Un moyen de fournir plus d'informations pour décrire la topographie est de former deux images de celle-ci avec deux décalages différents. Pour chaque fréquence spatiale, on reconstruit la TFR de la topographie à partir de l'image dans laquelle l'information, à la fréquence considérée, est *a priori*, la moins affectée par le bruit de mesure.

On forme deux topographies différentielles $\tilde{S}_1(k,m)$ et $\tilde{S}_2(k,m)$ de la même topographie avec deux décalages d_1 et d_2. Les fonctions de transfert sont respectivement $\tilde{H}_1(k,m)$ et $\tilde{H}_2(k,m)$. Pour résoudre le problème inverse, on définit (cf. figure 2) :

$$\tilde{H}_{eq}(k,m) = \sup_{|.|}[\tilde{H}_1(k,m),\tilde{H}_2(k,m)] \tag{8}$$

On en déduit les ensembles K_1 et K_2 :

$$K_1 = \left\{ k_1 |\, \tilde{H}_{eq}(k_1,m) = \tilde{H}_1(k_1,m) \right\}$$
$$K_2 = \left\{ k_2 |\, \tilde{H}_{eq}(k_2,m) = \tilde{H}_2(k_2,m) \right\}. \tag{9}$$

Comme $\tilde{H}_{eq}(k,m) \neq 0, \forall\, k \neq 1$, il vient :

$$\tilde{F}(k,m) = \begin{cases} \frac{\tilde{S}_1(k,m)}{\tilde{H}_{eq}(k,m)} & \forall\, k \in K_1, \\ \frac{\tilde{S}_2(k,m)}{\tilde{H}_{eq}(k,m)} & \forall\, k \in K_2. \end{cases}$$

Si les décalages introduits par les prismes de Wollaston sont supposés connus, on déduit la topographie recherchée $f(l,m)$ par TFR inverse, à un ensemble de constantes près. Ces constantes sont déterminées soit par des connaissances a priori sur l'objet, soit par une nouvelle mesure avec deux décalages dans la direction perpendiculaire.

4 Obtention du champ de déplacement

4.1 Déplacement hors-plan

Pour obtenir des champs de déplacement, on réalise des topographies avant et après chargement mécanique. On partage alors ces topographies en un polynôme et son complément. On appellera dans la suite "rugosité" ce complément. Le déplacement hors-plan est obtenu par différence des polynômes représentant la surface moyenne avant et après chargement.

4.2 Déplacement plan

Pour obtenir le champ de déplacement plan, on utilise la rugosité définie précédemment comme un marqueur de la surface, au même titre qu'un mouchetis de peinture ou que la texture naturelle [5]. Le champ de déplacement plan est obtenu en isolant cette rugosité et en utilisant l'algorithme proposé par Sutton *et al.* [6]. On note $\langle f,g\rangle(\mathbf{u})$ le produit d'intercorrélation de deux fonctions de $f(\mathbf{x})$ et $g(\mathbf{x})$ caractéristiques de la texture avant et après déplacement :

$$\langle f,g\rangle(\mathbf{u}) = \int f(\mathbf{x})g(\mathbf{x}-\mathbf{u})\mathrm{d}\mathbf{x}. \tag{10}$$

Dans le cas où g est le translaté (par $\mathbf{U}$) de f : $g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}+\mathbf{U})$ et le produit d'intercorrélation devient :

$$\begin{aligned}\langle f,g\rangle(\mathbf{u}) &= \int f(\mathbf{x})f(\mathbf{x}+\mathbf{U}-\mathbf{u})\mathrm{d}\mathbf{x} \\ &= \langle f,f\rangle(\mathbf{u}-\mathbf{U}).\end{aligned} \tag{11}$$

Comme $\langle f,f\rangle(\mathbf{v})$ est par construction maximum en $\mathbf{v}=\mathbf{0}$, le profil d'intercorrélation présente un maximum en $\mathbf{u}=\mathbf{U}$. C'est cette propriété que l'on exploite pour retrouver $\mathbf{U}$ à partir de la donnée de f et g, le produit d'intercorrélation pouvant être facilement calculé dans l'espace de Fourier [5].

5 Validation

Nous avons vérifié que la reproductibilité de mesure des topographies différentielles est limitée par le bruit de photons et est d'environ 10 pm à l'optimal. On présente sur la figure 3 un essai de validation de cette mesure de déplacement plan sur une surface de silicium observée avec un grandissement $\times 22$. Pour une zone de mesure de 1024×1024 pixels, l'erreur peut être décomposée en une incertitude (écart quadratique moyen) attribuée à la procédure de corrélation de l'ordre de $2{,}8 \times 10^{-2}$pixel (*i.e.,* 15nm) et une erreur systématique de 0,14 pixel (*i.e.,* 75nm) par rapport à la droite "idéale", de l'ordre de grandeur du jeu dans le dispositif permettant d'imposer le déplacement.

6 Conclusion

On a présenté un dispositif interférométrique pour révéler un marqueur lié à la topographie d'objets de taille micrométrique. Ce marqueur, avant et après chargement mécanique, permet de mesurer le champ de déplacement (plan et hors-plan) de la surface observée. Ces champs de déplacement sont le point de départ d'une procédure d'identification de propriétés mécaniques

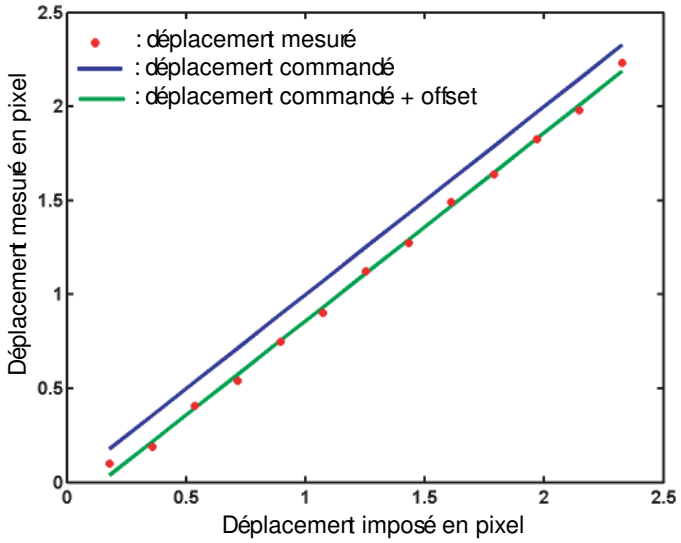

FIG. 3 – *Validation de la mesure de déplacement plan : déplacement mesuré en fonction du déplacement imposé.*

à l'échelle de quelques micromètres [7]. On pourra alors étudier les modifications de propriétés mécaniques induites, par exemple, par l'hybridation d'oligonucléotides adsorbés à la surface de MEMS.

Références

[1] M. Gad-El-Hak. *The MEMS Handbook*, CRC Press, 2002.

[2] R. Raiteri, M. Grattarola, H.J. Butt, P. Skladal. Micromechanical cantilever-based biosensors. *Sensors and Actuators B*, 79 : 115-126, 2001.

[3] P. Gleyzes, A.C. Boccara, H. Saint-Jalmes. Multichannel Nomarski microscope with polarization modulation: performance and applications. *Optics Letters*, 22 : 1529-1531, 1997.

[4] A. Dubois. Phase-map measurements by interferometry with sinusoidal phase modulation and four integrating buckets. *J. Opt. Soc. Am. A*, 18 : 1972-1979, 2001.

[5] F. Hild, B. Raka, M. Baudequin, S. Roux, F. Cantelaube. Multi-scale displacement field measurements of compressed mineral wool samples by digital image correlation.*Appl. Optics IP*,41 : 6815-6828, 2002.

[6] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Im. Vis. Comp.*, 1 : 133-139, 1983.

[7] F. Amiot, F. Hild, J.P. Roger. Measuring the displacement field of microcantilevers under electrostatic loading to identify their mechanical properties. In *Proceedings SEM X*, CD-ROM, 7p., 2004.