

## **Travaux Pratiques**

### **Profilométrie et vibrométrie optique**

Le but de ce TP est d'utiliser une technique de microscopie optique permettant d'imager des objets en trois dimensions, avec une résolution nanométrique en épaisseur, grâce à un procédé interférométrique. Contrairement à la microscopie de force atomique AFM, la résolution latérale est limitée par la diffraction de la lumière. Cette technique optique est donc adaptée à l'étude d'objets de dimensions micrométriques. Elle a cependant l'avantage d'être moins invasive puisqu'elle s'opère sans contact avec l'objet. En plus de la profilométrie statique haute résolution, un procédé d'éclairage stroboscopique permet de visualiser le profil de déformation d'objets micrométriques vibrants à haute fréquence et de reconstituer le mouvement complet sur une période d'oscillation. Cette technique de vibrométrie optique est notamment utilisée pour caractériser les modes propres de vibration des micro-systèmes électro-mécaniques MEMS.

La plateforme Nanomonde du CIME Nanotech possède un appareil de marque Fogale qui va nous permettre d'étudier les caractéristiques d'un microlevier de microscopie AFM en utilisant ces deux techniques de profilométrie et de vibrométrie optique. La résolution latérale sera limitée à quelques microns à cause du grossissement de l'objectif du microscope et de la résolution en pixels du capteur d'image. Ce microscope Fogale Zoomsurf 3D sera commandé à l'aide du logiciel Fogale 3D Pilot et les images seront traitées avec Fogale 3D Viewer.

#### **1. Description de la technique de mesure**

Le principe de la profilométrie optique est celui de l'interféromètre de Michelson. Un faisceau de lumière mono- ou poly-chromatique est séparé par une lame semi-réfléchissante en deux faisceaux qui se réfléchissent sur des miroirs avant d'être recombinaés. L'un des deux miroirs est ici remplacé par l'objet étudié, l'autre est un vrai miroir doté d'une translation piézoélectrique. Le faisceau envoyé sur l'objet traverse un objectif de microscope qui permet au retour d'en faire l'image sur une caméra numérique. Le relief de l'objet se traduit par un contraste interférentiel dû aux différences de trajet optique entre l'objet et le miroir.

En lumière monochromatique, le contraste interférentiel est périodique avec la différence de marche. Un profil topographique de pente uniforme donne ainsi un contraste sinusoïdal. La correspondance profil/contraste n'est donc pas immédiate. Pour linéariser cette dépendance, on enregistre l'évolution du contraste au cours d'une translation de  $\lambda/2$  du miroir de référence effectuée grâce à un actionneur piézoélectrique. Par un calcul automatique utilisant seulement quatre valeurs du contraste, on obtient alors la hauteur relative de chaque point, à un multiple de  $\lambda/2$  près dû à la périodicité des interférences. On obtient ainsi la topographie de la surface, par tranches d'épaisseur  $\lambda/2$ , puis un traitement logiciel permet de recoller les tranches.

Dans le cas d'une surface complexe avec de fortes variations de hauteur, il est préférable d'utiliser de la lumière polychromatique, avec laquelle le contraste interférentiel présente un maximum à différence de marche nulle. Il est ainsi possible de repérer la valeur absolue de la hauteur en détectant la position de ce maximum au cours d'une translation du miroir de référence sur une grande distance. Cette technique en lumière polychromatique est plus longue en terme d'acquisition de données et de temps de traitement car elle nécessite l'enregistrement complet de la figure d'interférence en tout point de l'image.

## 2. Profilométrie d'un microlevier AFM

Une pointe AFM est formée d'un levier micrométrique en silicium dépassant d'une base millimétrique servant à sa fixation sur l'appareil et sa manipulation par l'utilisateur. Le procédé de gravure permet en outre de laisser une pointe pyramidale en silicium à l'extrémité du levier pour la microscopie AFM. Nous allons nous d'abord intéresser au profil statique de ce levier, pour mettre en évidence la présence de contraintes mécaniques induites par la couche métallique réfléchissante déposée sur la face arrière.

### Réglage du parallélisme :

Choisir la source de lumière monochromatique et l'indiquer dans le logiciel.  
Faire une image nette d'une pointe AFM contact (levier long) sur la fenêtre de la caméra.  
Placer le scanner du miroir de référence au centre de sa course.  
Ajuster la mise au point pour faire apparaître des interférences.  
Ajuster le parallélisme objet/miroir en réglant l'orientation de l'objectif.  
Ajuster finement le parallélisme pour obtenir un contraste uniforme sur la base du levier.

### Profilométrie en lumière monochromatique:

Délimiter la zone de mesure correspondant seulement au levier libre à l'aide du rectangle vert.  
Ajuster la position du scanner pour maximiser le contraste des interférences.  
Ouvrir le menu « Paramètres > Mesure en décalage de phase ».  
Augmenter si nécessaire le nombre d'images moyennées pour réduire le bruit.  
Cocher la case « Calculer la carte de contraste » et choisir une valeur de 0.2.  
Démarrer l'acquisition dans « Mesure > Mesure en décalage de phase ».  
Des fenêtres apparaissent nommées « Surface », « Phase » et « Contraste ».  
Sélectionner la fenêtre « Surface » (fermer les autres) et enregistrer l'image (format .tpo).  
Visualiser le levier en vue 3D, en coupe longitudinale, et mesurer la flèche.

### Profilométrie en lumière polychromatique:

Choisir la source de lumière polychromatique et l'indiquer dans le logiciel.  
Chercher le contact optique avec le scanner du miroir de référence.  
Délimiter sur l'écran une zone de mesure plus grande incluant le support du levier.  
Enregistrer les positions extrêmes du scanner donnant des interférences dans toute cette zone.  
Ouvrir le menu « Paramètres > Mesure en lumière blanche ».  
Choisir une résolution verticale du scan d'environ 20 nm.  
Démarrer l'acquisition de la topographie dans « Mesure > Mesure en lumière blanche ».  
Deux fenêtres apparaissent nommées « Surface » et « Contraste ».  
Sélectionner la fenêtre « Surface » (fermer l'autre) et enregistrer l'image (format .tpo).  
Visualiser le levier en vue 3D et en coupe longitudinale.  
Mesurer la flèche et la hauteur de marche entre la base et le levier.

### Analyse détaillée :

Ouvrir l'image du levier seul avec Fogale 3D Viewer et tracer une coupe longitudinale.  
L'extraire par un double-click sur le graphe et l'enregistrer en format texte (surface ascii .txt).  
Ouvrir ce fichier texte avec le logiciel Excel (les séparateurs sont des point-virgules).  
Faire un graphique montrant ce profil et ajouter une courbe de tendance.  
Choisir un ordre polynomial 2 (puis 3) et sélectionner l'option d'affichage de la formule.  
Discuter de l'ajustement du profil mesuré par ces courbes polynomiales.  
Discuter de l'origine de la courbure observée sachant qu'une contrainte uniforme induit une courbure constante, alors qu'une force localisée à l'extrémité induit une courbure variable.

### **3. Vibrométrie d'un microlevier AFM**

Nous allons maintenant nous intéresser aux modes propres de vibration du microlevier placé sur un support doté d'un dispositif bimorphe capable de générer des vibrations sous l'action d'une tension alternative. En balayant la fréquence d'excitation, il est possible de détecter les trois premières fréquences de résonance. On peut ensuite visualiser leur profil de déformation grâce à un éclairage stroboscopique qui fige le mouvement dans une certaine position en fonction du déphasage choisi entre l'excitation mécanique et les impulsions de l'éclairage stroboscopique. Des mesures profilométriques sont effectuées pour différentes valeurs du déphasage excitation/éclairage entre 0 et  $2\pi$  de manière à pouvoir reconstruire le mouvement complet du microsystème en fonction du temps.

#### Réglage des interférences :

Choisir la source de lumière monochromatique et l'indiquer dans le logiciel.

Placer une pointe AFM contact (levier long) sur un support de pointe Veeco.

Faire une image nette de l'objet sur la fenêtre de la caméra.

Ajuster la mise au point pour obtenir des interférences.

Ajuster l'orientation de l'objectif pour obtenir un contraste uniforme sur la base du levier.

Ajuster la position du scanner pour optimiser le contraste des interférences sur le levier.

#### Mesure des fréquences de résonance :

Connecter le support de pointe sur la voie 1 du générateur de tension sinusoïdale.

Activer la fenêtre « Générateur » et appliquer 5 V sur la voie 1 du générateur.

Sélectionner une petite région du levier de contraste uniforme avec le rectangle vert.

Choisir 2000 pas entre 10 et 14 kHz dans le menu « Paramètres > Spectre en vibration ».

Démarrer la mesure dans « Mesure > Spectre en vibration ».

Afiner la recherche du pic de résonance en ajustant la plage des fréquences balayées, la zone mesurée sur le levier, la tension d'excitation (10 V maxi).

Noter la valeur de la fréquence de résonance du mode fondamental.

Répéter l'opération à plus haute fréquence pour chercher le deuxième et le troisième modes.

On s'aidera des prédictions théoriques sur les fréquences propres (voir compléments à la fin).

Comparer ces valeurs mesurées aux prédictions (valeur absolue et rapport entre les modes).

#### Etude du profil de vibration :

Connecter la voie 2 du générateur de tension sinusoïdale à l'électronique Zoomsurf 3D.

Basculer l'interrupteur de DAC vers GBF à l'arrière de l'appareil et dans le logiciel.

Activer la fenêtre « Générateur » pour commander les deux voies du GBF.

Choisir un éclairage continu en activant la voie 2 avec un rapport cyclique de 100 %.

Entrer la fréquence de résonance du mode fondamental sur la voie 1.

Observer l'évolution du contraste sur le levier en activant / désactivant la voie 1.

Choisir ensuite un éclairage stroboscopique avec un rapport cyclique de 20 %.

Entrer la fréquence de résonance décalée de 1 Hz sur la voie 2.

Observer le mouvement ralenti de l'oscillation.

Entrer une fréquence identique sur la voie 2 et sur la voie 1.

Observer le changement de position des franges lorsque la phase est changée de  $90^\circ$ .

Délimiter la zone de mesure correspondant seulement au levier libre à l'aide du rectangle vert.

Ouvrir le menu « Paramètres > Mesure automatique de phase et d'amplitude ».

Choisir par exemple de moyenniser 4 « images » et de mesurer 3 « phases » du mouvement.

Choisir de ne pas « calculer la carte de contraste » et de ne pas « déplier la phase » (inutile).

Démarrer la mesure dans « Mesure > Mesure automatique de phase et d'amplitude ».

Plusieurs fenêtres apparaissent : « Surface Amplitude », « Surface », « Phase », « Contraste ». Sélectionner la fenêtre « Surface Amplitude » montrant la vibration en nm (fermer les autres). Visualiser le levier en vue 3D, en coupe longitudinale, et mesurer l'amplitude de vibration. Enregistrer cette image (format .tpo).

#### Analyse détaillée :

Ouvrir l'image avec Fogale 3D Viewer et tracer une coupe longitudinale. L'extraire par un double-click sur le graphe et l'enregistrer en format texte (surface ascii .txt). Ouvrir ce fichier texte avec le logiciel Excel (les séparateurs sont des point-virgules). Faire un graphique montrant ce profil et ajouter une courbe de tendance. Choisir un ordre polynomial de 2 à 4 et sélectionner l'option d'affichage de la formule. Discuter de l'ajustement du profil de vibration par ces courbes polynomiales. Comparer le résultat au profil prédit par la théorie (voir compléments à la fin). Comparer aussi ce profil en dynamique au profil statique mesuré précédemment.

#### Etude des modes d'ordres supérieurs :

Répéter la procédure de mesure du profil de vibration pour les modes  $n=1$  et  $n=2$ . Ajuster si nécessaire l'amplitude de la tension d'excitation (10 V maxi). Comparer les profils des trois premiers modes (ramenés à la même tension d'excitation).

---

#### **Quelques résultats théoriques sur les modes propres de vibration des leviers :**

Pour une poutre rectangulaire fixée à une extrémité, la fréquence propre du mode d'indice  $n \geq 0$  est donnée par la relation :

$$2\pi f_n = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{l^2} \alpha_n$$

où  $E$  est le module d'Young,  $\rho$  la masse volumique,  $t$  l'épaisseur,  $l$  la longueur, et  $\alpha_n$  un coefficient numérique :

|            |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|
| $n$        | 0     | 1     | 2     |
| $\alpha_n$ | 1.015 | 6.361 | 17.95 |

Pour le mode  $n=0$  d'une poutre de longueur  $l$ , la théorie prévoit un profil de déformation qui suit un polynôme d'ordre 4 :

$$z(y) = z(l) \frac{y^4 - 4ly^3 + 6l^2y^2}{3l^4}$$

---

#### **Quelques valeurs caractéristiques pour les microleviers en silicium :**

On donne le module d'Young et la densité du silicium :

$$E = 150 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$$

Pour un microlevier en silicium d'une pointe AFM de type contact, la fréquence de résonance des trois premiers modes est typiquement :

$$f_0 = 12 \text{ kHz}$$

$$f_1 = 75 \text{ kHz}$$

$$f_2 = 210 \text{ kHz}$$

Suivant la longueur du microlevier (pointes contact ou tapping), la fréquence fondamentale varie typiquement de 10 kHz à 300 kHz.