

Problématique

Le but de ce projet est d'améliorer de façon significative les performances de la microscopie à force atomique en mode non-contact (NC-AFM) en développant de nouveaux capteurs de force (ou cantilevers - CL). Dans ce mode d'AFM, le cantilever (CL) est inséré dans une boucle à réaction positive qui oscille à la fréquence de résonance du CL, pendant qu'une autre boucle maintient constante son amplitude d'oscillation. Le signal qui est utilisé pour former l'image est la fréquence de résonance du CL, qui varie sous l'influence des forces que la surface exerce sur la pointe. Ce mode s'est avéré le plus sensible depuis une dizaine d'années. C'est le seul à permettre d'atteindre la résolution atomique sur une grande gamme de surfaces (métaux, semi-conducteurs covalents ou ioniques, isolants covalents ou ioniques...).

En NC-AFM, la force détectable minimale, fixée par les fluctuations thermiques du CL est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence de résonance et du facteur de qualité du CL. Il est donc possible d'améliorer la sensibilité de l'instrument en augmentant la fréquence de résonance et/ou le facteur de qualité du CL.

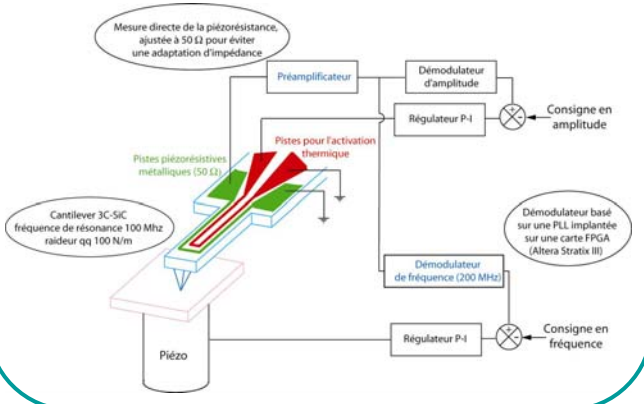
Augmenter la fréquence de résonance en maintenant la raideur k à une valeur compatible avec le NC-AFM impose de diminuer la masse effective du dispositif, et donc une réduction en taille. Notre but est de développer des CLs de dimensions submicroniques à partir de films de carbure de silicium 3C-SiC élaborés par épitaxie sur Si. Les excellentes propriétés mécaniques de SiC, combinées à la petite taille de ces dispositifs permettront d'atteindre des fréquences de résonance de l'ordre de 100 MHz, soit 100 fois plus élevées que pour les CLs utilisés actuellement. De plus, l'optimisation des propriétés du matériau SiC devrait permettre d'augmenter le facteur de qualité Q. Notre stratégie consistera d'abord à étudier l'influence des défauts de volume et de surface sur la dissipation de l'énergie mécanique en caractérisant aussi finement que possible un panel d'échantillons élaborés dans différentes conditions, puis à utiliser les conclusions de cette étude pour améliorer le matériau en optimisant les conditions de croissance. Nous pensons que ces améliorations seront profitables bien au-delà des applications au NC-AFM, pour les MEMS/NEMS à base de SiC ainsi que pour les applications en électronique de puissance.

La petite taille de ces CLs (typiquement $2.5 \times 1 \times 0.4 \mu\text{m}^2$) rend inadaptées les techniques optiques habituellement utilisées pour mesurer les oscillations des CLs. La méthode qui sera mise en oeuvre utilisera les variations de la résistance d'un film métallique mince déposé sur le cantilever sous l'effet des déformations générées par son mouvement. Cette approche, basée sur la piézorésistivité d'un métal, est radicalement différente de l'approche basée sur la piézorésistivité d'un semi-conducteur, mise en oeuvre depuis environ 10 ans pour des CLs d'AFM. Comme cela a été montré récemment [1], elle présente certains avantages, qui seront mis à profit dans le présent projet.

L'accroissement de la fréquence de résonance en NC-AFM n'est pas seulement limitée par l'absence de CLs adaptés, mais aussi par la gamme en fréquence limitée des électroniques commerciales (~5 MHz). Etendre cette gamme à 100 MHz requière des solutions techniques nouvelles qui seront développées au sein du projet.

Enfin, l'optimisation de l'instrument et de son système de contrôle demandera des simulations numériques poussées, menées en adaptant à des CLs à 100 MHz un programme existant de NC-AFM "virtuel". Ce projet réunit dans le même consortium des experts en élaboration et polissage de SiC, en MEMS/NEMS à base de SiC, ainsi qu'en instrumentation et modélisation en NC-AFM. La stratégie globale du projet est de couvrir toute la séquence, de l'élaboration du SiC à l'utilisation des CLs lors d'expériences de NC-AFM.

Intégration des cantilevers piézorésistifs dans l'AFM en mode non contact

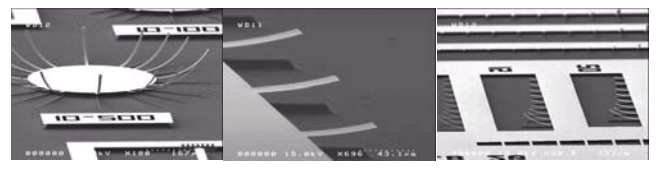


Noms et rôle des équipes participantes

- Centre d'Elaborations de Matériaux et d'Etudes structurales (CEMES – www.cemes.fr)
Coordination, mesures piézorésistives, simulations numériques, études NC-AFM
- Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN – www.lpn.cnrs.fr)
Microfabrication des cantilevers, simulations numériques
- Institut Matériaux, Microélectronique et Nanosciences de Provence (IM2NP - www.im2np.fr)
Développement d'un démodulateur de fréquence à 200 MHz, simulations numériques, études NC-AFM
- NOVASIC (www.novasic.com)
Elaboration, caractérisation et améliorations des couches SiC/Si
- Centre de Recherche sur l'Hétéroépitaxie et ses Applications (CRHEA – www.crhea.cnrs.fr)
Elaboration, caractérisation et améliorations des couches SiC/Si
- Laboratoire de Microélectronique de Puissance (LMP – www.lmp.univ-tours.fr)
Microfabrication des cantilevers, mesures des constantes élastiques de SiC

Durée du projet: 4 ans

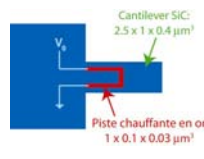
Exemples de réalisation de structures en 3C-SiC destinées à la mesure des paramètres élastiques du matériau



Simulation de l'excitation thermique

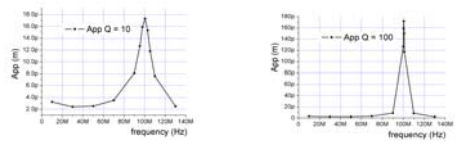
Exciter le cantilever à sa fréquence de résonance est problématique pour les fréquences très élevées (100 MHz). La solution conventionnelle, qui consiste à utiliser une céramique piézoélectrique n'est pas bien adaptée car celle-ci présente des résonances dans cette gamme de fréquence. Il est préférable d'intégrer le dispositif d'excitation au cantilever. Nous avons choisi d'utiliser l'excitation thermique [2].

Des simulations numériques de l'efficacité de ce type d'excitation ont été réalisées en utilisant le logiciel de calcul par éléments finis COMSOL Multiphysics [3] avec la géométrie modèle présentée sur la figure ci-contre.

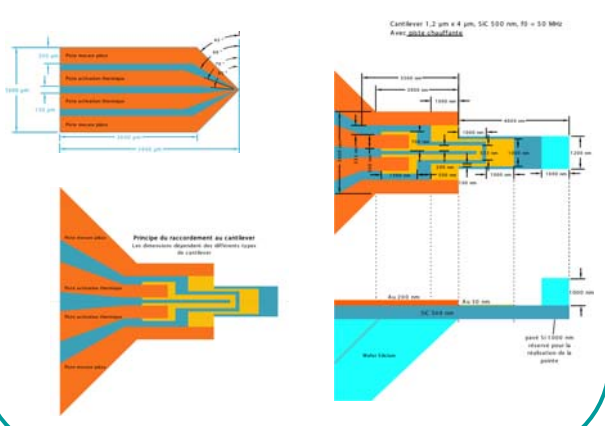


Le calcul par éléments finis donne une fréquence de résonance de 100.51 MHz et une raideur de 455 N/m en bon accord avec un calcul analytique où l'on considère que le cantilever est intégralement couvert d'or, qui donne 102.7 MHz et 471 N/m.

La réponse simulée à la fréquence f à une excitation électrique à la fréquence $f/2$ est présentée sur les figures ci-dessous pour 2 valeurs du facteur de qualité Q. On retrouve bien un pic autour de la fréquence de résonance, d'une largeur relative donnée par Q^{-1} . L'amplitude varie linéairement avec Q comme attendu. On atteint 0.17 nm à la résonance pour une excitation $V_0=0.1V$ et $Q=100$. L'élévation maximale de température, qui se produit au voisinage des extrémités des pistes chauffantes est de 0.75°C. A $V_0=0.4V$, on multiplie la puissance, l'élévation de température et la déflexion par 16, comme approximativement attendu. Pour $Q=1000$ [1], on devrait atteindre une amplitude pp de 27 nm et une élévation de température de 11 K, ce qui est acceptable.



Premier design de cantilever piézorésistifs avec excitation thermique



Références: [1] "Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high frequency applications" Mo Li, H. X. Tang and M. L. Roukes, Nature Nanotechnology, vol. 2, 714 (2007).
[2] "Frequency-Dependent Electrical and Thermal Response of Heated Atomic Force Microscope Cantilevers", K. Park, J. Lee, Z. M. Zhang and W. P. King, J. Microelectromech. Syst. Vol. 16, 213 (2007).
[3] www.comsol.fr/

Contact: gauthier@cemes.fr