

ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire : Institut des NanoSciences de Paris

Etablissement de rattachement : Université Pierre et Marie Curie

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Laurent Belliard HDR (28),

laurent.belliard@upmc.fr

Titre de la thèse : **Spectroscopie vibrationnelle de nanostructures.**

Collaborations dans le cadre de la thèse :

- Aix-Marseille Université, CNRS, IM2NP UMR 7334, Faculté des Sciences et Techniques, Campus de Saint-Jérôme, Avenue Escadrille Normandie Niemen – Case 142, F-13397 Marseille Cedex, France

- GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research, Planckstr. 1, D-64291 Darmstadt, Germany

- LSPM-CNRS, Université Paris 13, Sorbonne Paris-Cité, 99 Avenue J.B.Clément 93430 Villetaneuse, France

Rattachement à un programme : aucun

Résumé du sujet :

La réduction des dimensions d'un système s'accompagne naturellement d'une augmentation de ses fréquences de résonances acoustiques. Les approches de spectroscopies résolues en temps sont à ce titre particulièrement pertinentes pour aborder l'étude du paysage vibrationnel des nanostructures.

L'objectif de ce travail est donc l'étude des modes de vibration au sein de systèmes confinés dans l'espace. Des études préliminaires réalisées sur des nanostructures d'or lithographiées ont démontré, d'une part l'importance du couplage entre ces entités et leur environnement, et d'autre part que de telles nanostructures pouvaient être considérées comme des nano-sources acoustiques. La grande nouveauté étant la mise en évidence d'une nouvelle voie de transduction d'ondes transverses contrôlables en fréquence au travers de la forme et de la nature des objets considérés.

L'étude de systèmes modèles, obtenus par des approches de nano structuration de surface (lithographie électronique...) revêt aussi bien des aspects fondamentaux que des considérations plus appliquées (notamment dans le domaine des MEM's). Dans un premier temps l'étude portera sur des nanofils de cuivre de diamètre variable, réalisés par électrodéposition dans les pores d'une membrane. Les outils de microscopie développés par notre équipe, permettent d'ores et déjà l'étude élastique de tels nanofils de manière individuelle. Après une étude préliminaire sur des structures simplement déposées sur des wafers de silicium, nous envisageons d'approfondir le travail en modifiant le contact entre la nanostructure et son environnement. La voie envisagée étant de venir fonctionnaliser les substrats de silicium sur lesquels seront dispersées les nanostructures. Ensuite, les potentialités en terme de transduction à partir de ces nanosources acoustiques seront abordées.

A. Amziane, L. Belliard, F. Decremps, B. Perrin, Phys. Rev B **83**, 014102 (2011)

Techniques utilisées : Microscopies résolues en temps. Interférométrie optique. Modélisation par éléments finis

Sujet développé

Spectroscopie vibrationnelle de nanostructures

D'un point de vue plus général, l'élasticité de nano-objets suscite un vif intérêt dans la communauté scientifique. En effet, bon nombre de questions restent en suspens, comme par exemple la limite de validité en taille de l'hypothèse du milieu continu, le rôle des champs de contraintes internes, comment les dislocations se créent et s'annihilent dans le domaine plastique ?, quel est l'impact des procédés de structuration sur la réponse mécanique de ces entités ? Afin de répondre à ces interrogations, de nombreux travaux sont entrepris en mettant en œuvre des approches quasi-statiques couplant des essais de traction compression flexion avec des méthodes de diffraction X extrêmement sensibles à l'organisation locale^{1,2}. De très belles cartographies, à l'échelle nanométrique, des champs de contraintes au sein d'objets confinés commencent à être rapportées dans la littérature. Cette problématique est au cœur de l'ANR « Mécanique des Nano-objets étudiée In situ par diffraction X: étude in situ des déformations et des défauts (diffraction cohérente des rayons X) au cours d'un chargement mécanique (AFM) » coordonnée par l'IM2NP de Marseille. En collaboration avec les partenaires de cette ANR, nous envisageons actuellement l'étude de la réponse dynamique d'objets modèles, tels que des nanofils de diamètre et de nature variable. Les paramètres élastiques sont accessibles au travers de l'analyse des différents modes de résonance de ces objets, faut il encore que la finesse spectrale de la dynamique vibrationnelle soit suffisamment bonne. La communauté scientifique s'intéresse depuis plusieurs décennies à la dynamique de nanoparticules de composition et de forme diverses. Initialement, des mesures moyennées sur un nombre important d'objets ont été rapportées suivies depuis les années 2000 par des approches expérimentales permettant de sonder individuellement les modes propres de nanoparticules³. Le point commun de toutes ces publications récentes réside dans la mise en évidence que le couplage entre la particule et son environnement, notamment le substrat, est à l'origine d'une forte atténuation des modes de respiration. Par conséquent, il s'ensuit dans l'espace des fréquences la détection de pics relativement larges, en d'autres termes les nanooscillateurs étudiés jusqu'à ce jour, présentent des facteurs de qualité médiocres, n'excédant pas 30. La relaxation énergétique entre la particule et son substrat représente donc une limitation qu'il convient maintenant de dépasser afin d'extraire des propriétés élastiques plus subtiles au sein de ces nanostructures.

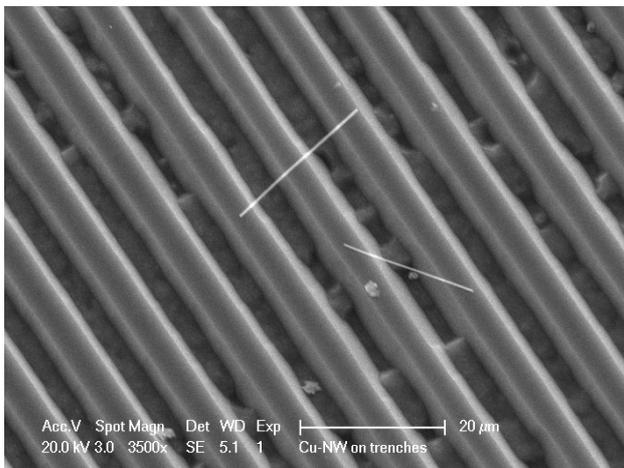


Figure 1 : Substrat fonctionnalisé avec des nanofils de cuivres dispersés au dessus des tranchées.

Ainsi afin de s'abstraire de possibles couplages avec l'environnement, nous envisageons d'étudier la réponse vibrationnelle de nanofils métalliques de diamètre variable et ceci dans une géométrie auto suspendue, en préparant au préalable les substrats de silicium à l'aide de techniques de gravure anisotrope que j'ai développées au sein de la salle blanche de l'INSP. Des résultats prometteurs laissent augurer d'une augmentation des facteurs de qualité, conséquence d'un meilleur confinement élastique au sein même de la nanostructure. La dernière voie de

relaxation, outre l'atténuation intrinsèque du cuivre réside dans le guidage des ondes acoustique le long du fil. A ce titre, cette propagation élastique confinée le long de l'axe de ces structures pourra être abordée et ensuite mise à profit pour produire des plans de nanosources acoustiques de propriétés contrôlables en fréquence et en répartition. La relaxation énergétique entre la particule et son substrat qui représentait dans le premier volet une limitation sera ensuite mise à profit pour utiliser ces nanostructures, dont la réponse vibrationnelle sera connue, comme des nanogénérateurs⁴, l'un des objectifs ainsi recherché sera la transduction d'ondes longitudinales et transverses de très haute fréquences (plusieurs dizaine de GHz)

Les outils expérimentaux qui seront mis a profit au cours de ce travail repose sur une approche mise au point par H. Maris dans les années 80, communément appelée de nos jours l'acoustique picoseconde⁵.

L'expérience consiste en une génération et une détection tout optique dans un schéma de type pompe-sonde. Une impulsion ultra brève (100fs), communément appelée la pompe, est absorbée par le système. Cet apport d'énergie engendre une déformation locale du réseau, qui de proche en proche se propage au sein du système. Dans le cas des nanostructures, cet apport de chaleur va induire des dilatations de l'objet qui vont naturellement exciter ces modes propres. La déformation de l'objet va ensuite moduler sa réponse optique qui sera mesurée

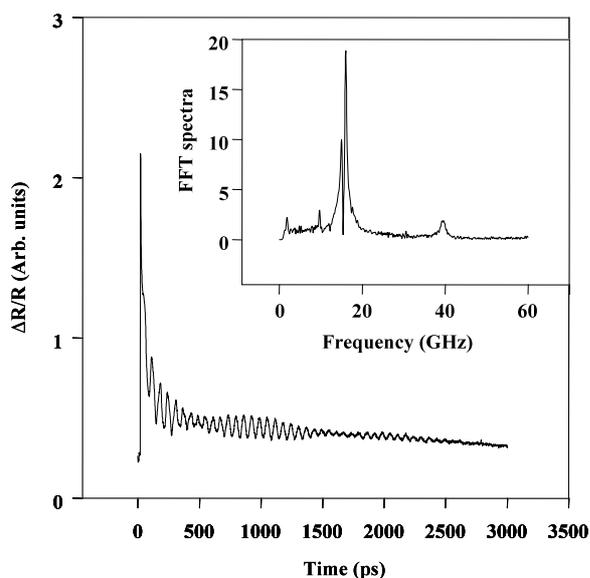


Figure 2 : Réflectivité résolue en temps sur un fil de cuivre de 200nm de diamètre. Insert : La FFT du signal révèle de nombreuses signatures résonnantes.

soit en réflectivité soit en interférométrie à l'aide d'une autre impulsion, nommée la sonde. Afin de suivre l'évolution temporelle à la surface libre, cette impulsion sonde est retardée à l'aide d'une ligne à retard. En agissant sur le chemin optique de la sonde, le délai pompe-sonde peut être contrôlé avec une résolution temporelle permettant de sonder une gamme de fréquence allant du GHz au THz. La figure 2 présente une réponse vibrationnelle typique des systèmes que nous aurons à étudier. Le spectre de Fourier fait ainsi apparaître des pics étant généralement la signature de modes de respirations. La position en fréquence de ces signatures acoustiques sera au cœur de nos préoccupations.

Nous corrélerons ces résultats avec des outils de simulations par éléments finis ainsi qu'avec des approches semi analytiques pour les géométries simples.

- [1] R. Maass, D. Grolimund, S. VAN Petegem; M. Willimann, and al, Appl. Phys. Lett. **89**, 151905 (2006)
- [2] M.D. Uchic, D. M. Dimiduk, J. N. Florando, W. D. Nix, Science **304**, 986 (2004)
- [3] M.A. van Dijk, M. Lippitz, M. Orrit, Phys. Rev. Lett. **95**, 267406 (2005)
- [4] A. Amziane, L. Belliard, F. Decremps, B. Perrin, Phys. Rev B **83**, 014102 (2011)
- [5] C. Thomsen, J. Strait, Z. Vardeny, H.J. Maris, J. Tauc, J.J Hauser, Phys.Rev.Lett. **53**, 989 (1984)