

Comment un mode de la bande interdite phononique se confine-t-il dans un défaut ?

Après qu'une équipe de théoriciens du MIT a démontré que des phonons et des photons pouvaient être localisés simultanément au sein d'une même cavité créée dans une nanostructure de silicium, s'est posée la question de leurs interactions mutuelles. C'est dans ce contexte que des chercheurs de l'équipe « Cristaux phononiques » de l'INSP, en collaboration avec un groupe de l'IEMN de Lille, ont étudié la dynamique de confinement d'une onde élastique, dans un défaut de type « lacune » introduit au sein d'un cristal phononique bidimensionnel. Pour cela, ils ont mesuré in situ par des expériences résolues en temps, les déplacements associés aux modes acoustiques localisés dans le défaut. Ils ont montré que l'énergie élastique se localise d'abord dans la partie du défaut la plus éloignée de la source acoustique et que la dynamique de localisation dépend de la symétrie du mode de défaut.

Lorsqu'on introduit un défaut ponctuel dans un cristal phononique parfait, on modifie les propriétés de la bande interdite, ce qui se traduit en général par l'apparition d'un ou plusieurs modes de vibration localisés dans le défaut. La détermination de la fréquence et de la polarisation de ces modes se fait le plus souvent par un développement en ondes planes des équations de propagation ou par des calculs par éléments finis. Ces deux méthodes numériques permettent de prédire où sont les nœuds et les ventres du ou des modes stationnaires piégés dans le défaut, quelles sont les fréquences de ces modes et leur phase, mais elles ne renseignent ni sur le régime transitoire qui précède l'état stationnaire, ni sur la façon d'exciter ces modes localisés.

Le cristal phononique bidimensionnel que nous avons étudié, est un arrangement en nid d'abeille de trous percés dans une membrane de silicium épaisse d'une centaine de microns (Fig. 1). Si on omet de percer un trou au sein du cristal, on crée une cavité bidimensionnelle susceptible de confiner trois modes de cavité, dont deux seulement ont une composante hors-plan significative (Fig. 2). Ces deux modes ont des fréquences très proches, soit 15,3 et 15,4 MHz pour la géométrie de cette hétérostructure. Les expériences que nous avons menées sur ce système ont consisté à mettre cette plaque phononique en vibration sur un mode de flexion antisymétrique (mode de Lamb A0) à la fréquence d'un des modes du défaut, en l'illuminant avec des impulsions laser brèves (30 ps) puis à observer les déplacements de la surface en fonction du temps en différents points de la cavité, à l'aide d'un interféromètre de Michelson permettant de mesurer des déplacements de quelques picomètres. On enregistre ainsi une carte temps/position dont un exemple est reproduit sur la figure 3.

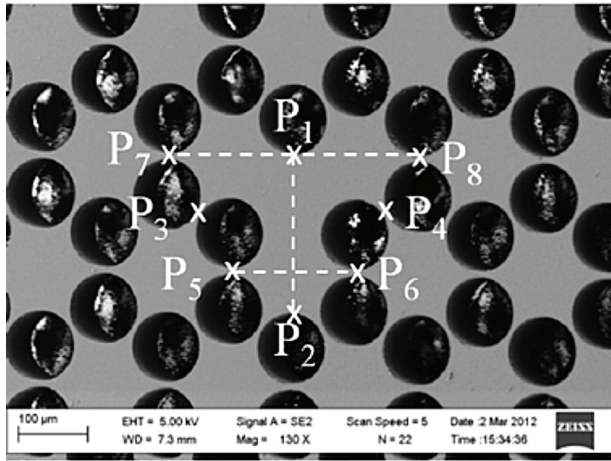


Figure 1
Image MEB de la cavité phononique. La membrane mesure $220 \mu\text{m}$ entre P1 et P2 et $350 \mu\text{m}$ entre P7 et P8. Les traits pointillés indiquent les points de mesure.

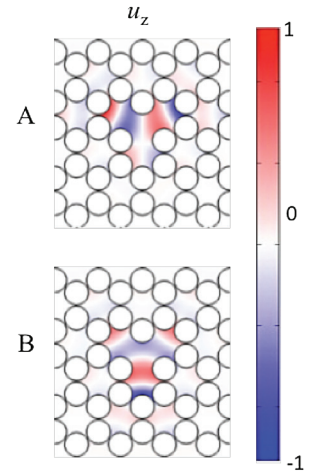


Figure 2
Amplitude de la composante hors-plan pour deux modes localisés dans la cavité représentée sur la figure 1.

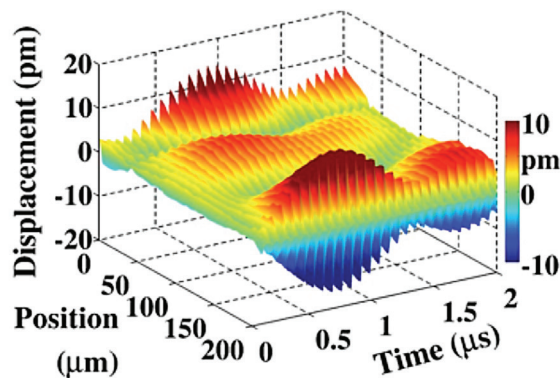


Figure 3
Composante hors-plan du déplacement mesuré le long de la ligne joignant P1 (0 sur l'axe des positions) à P2 ($\sim 200 \mu\text{m}$). La fréquence de l'onde acoustique est centrée sur 15 MHz.

Nos expériences montrent que l'on peut exciter sélectivement l'un ou l'autre des modes de cavité en choisissant une position de la source élastique qui respecte la symétrie du mode. Elles indiquent également qu'un ventre de vibration se forme d'abord au point de la cavité le plus éloigné de la source acoustique (P2 sur la figure 1), environ 200 ns (pour le mode B à 15,4 MHz) avant qu'un autre ventre n'apparaisse à l'entrée de la cavité en P1. Ce retard est lié au temps que met l'impulsion ultrasonore pour effectuer un aller-retour dans la cavité et à interférer ainsi avec elle-même pour former une onde stationnaire dans la cavité.

L'ensemble de ces résultats est transposable par un simple facteur d'échelle au cristal phononique bidimensionnel sur une membrane de silicium ayant des dimensions latérales de quelques centaines de nanomètres. Sous certaines conditions, un mode élastique ET un mode optique à la longueur d'onde utilisée pour les télécommunications optiques ($\lambda=1,5 \mu\text{m}$) peuvent être confinés simultanément – et donc interagir – au sein d'une cavité introduite dans une telle hétérostructure et que l'on appelle alors un cristal phoXonique.

Référence

"Dynamics of confined cavity modes in a phononic crystal slab investigated by in situ time-resolved experiments"
R. Marchal, O. Boyko, B. Bonello, J. Zhao, L. Belliard, M. Oudich, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani
Physical Review B 86, 224302, 2012

Contact

bernard.bonello@insp.jussieu.fr