

# Cristaux phononiques 1D à larges bandes de fréquences interdites

E. Coffy<sup>1</sup>, S. Euphrasie<sup>1</sup>, P. Vairac<sup>1</sup>, A. Khelif<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, UBFC, CNRS, ENSMM, UTBM,  
15B Av. des Montboucons, F-25030 Besançon, France  
etienne.coffy@femto-st.fr

## Résumé

Ce papier décrit une méthode pour obtenir de larges bandes de fréquences interdites dans des structures phononiques. Basée sur l'étude de la localisation de l'énergie sur la cellule élémentaire, cette méthode permet l'aplatissement et la suppression des modes et donc l'élargissement des bandes interdites.

## 1. Introduction

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques qui exhibent des propriétés spéciales pour la propagation des ondes élastiques. Pour certaines bandes de fréquences, il est en effet possible d'interdire la propagation de toutes ondes élastiques, quelque soit leurs polarisations. Ces phénomènes peuvent être utilisés pour des applications diverses telles que le filtrage, le guidage, l'isolation etc [1-3]. L'utilisation de structures avec de larges bandes de fréquence interdites (BFI) permettant généralement de meilleures performances pour les dispositifs, un certain nombre d'études visent à étudier les mécanismes d'ouverture et d'élargissement de ces BFI [4,5]. Ce papier concerne la description d'une méthode de design basé sur l'aplatissement et la suppression des modes grâce à l'étude de la localisation de l'énergie sur la cellule élémentaire. L'utilisation de piliers de tungstène placés périodiquement sur une poutre structurée de silicium permet la création de BFI liées aux résonances locales des piliers ainsi qu'à la diffraction de Bragg.

## 2. Structures phononiques

Les structures phononiques utilisées dans ce papier sont représentées dans la Fig. 1. Les diagrammes de dispersion sont obtenus par la méthode des éléments finis. Les structures sont assumées infinies, les études sont donc ramenées aux cellules élémentaires (Fig.1 (a), (b) et (c)) avec les conditions périodiques de Bloch-Floquet sur les faces normales à la direction de propagation de l'onde. La transmission à travers un nombre fini de périodes pour la structure S2' est calculée avec la structure représentée en Fig.1 (d). Une onde mixte ou polarisée est générée en amont de la structure (arête rouge) et est mesurée sur l'arête bleue. Des PML (Perfectly Matched Layers) sont placés de part et d'autre de la structure afin de supprimer les réflexions pouvant provenir des bords de la structure.

## 3. Résultats

Le diagramme de dispersion de la structure S1 (fréquence normalisée avec la période f.a en fonction du vecteur d'onde) est représenté en Fig. 2 (a). L'introduction des piliers de tungstène permet l'ouverture de plusieurs BFI

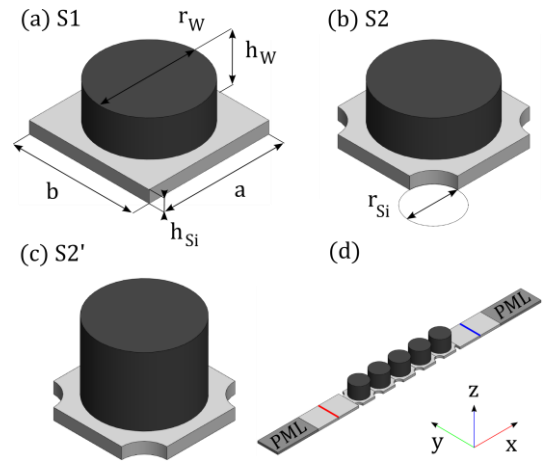


Figure 1. Schémas des structures (clair : silicium, foncé tungstène). (a), (b) et (c) Cellule élémentaire de S1, S2 et S2'. (d) Structure finie S2' utilisée pour le calcul de la transmission

dont la principale possède une largeur relative (largeur de la BFI sur sa fréquence centrale) de 45%. Afin d'élargir la BFI, nous avons étudié les modes la séparant de la deuxième plus large BFI. Le déplacement total de ces modes est représenté dans la Fig. 2 (b). La majorité des déplacements des modes 1A, 1C et 1D est localisée dans les coins de la cellule élémentaire. L'idée est donc d'enlever le silicium aux coins de la cellule afin d'empêcher la propagation d'énergie entre les périodes et donc d'aplatir les modes.

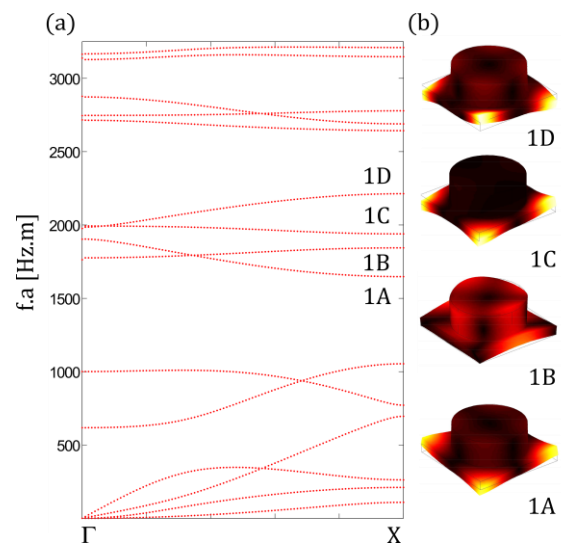


Figure 2. Structure S1. (a) Diagramme de dispersion. (b) Déplacement total des modes 1A-1D.

Le diagramme de dispersion de la structure S2, est représenté dans la Fig. 3 (a). Les quatre modes précédents sont réduits à deux modes quasi plats dont les déplacements sont représentés dans la Fig. 3 (b). Bien qu'un déplacement assez important puisse être noté au niveau de la base de silicium, ces modes sont principalement affectés par la résonance des piliers de tungstène. La valeur du rayon du trou fait dans le silicium n'influe que peu sur le comportement des modes.

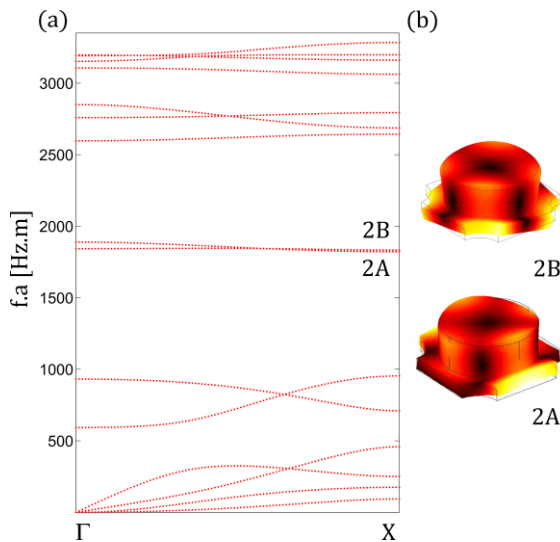


Figure 3. Structure S2. (a) Diagramme de dispersion. (b) Déplacement total des modes 2A et 2B.

L'optimisation des paramètres du pilier de tungstène, en particulier de sa hauteur, permet de déplacer les deux précédents modes vers des fréquences plus élevées et d'ouvrir une large BDI avec une largeur relative de 90%. Le diagramme de dispersion de cette structure optimisée est représenté dans la Fig. 4 (a). La transmission d'une structure phononique composée de cinq périodes de S2' est présentée dans la Fig. 4 (b). L'atténuation maximale est atteinte au milieu de la BFI et vaut environ -115 dB, ce qui souligne l'intérêt des structures à large band gap au vu de la compacité du dispositif.

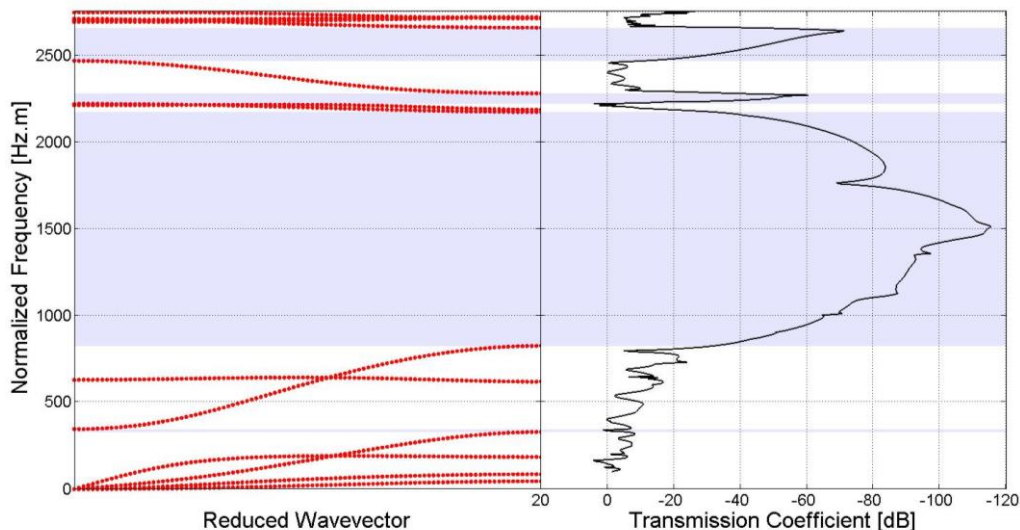


Figure 4. Structure S2'. (a) Diagramme de dispersion. (b) Transmission à travers S2' avec cinq périodes

## 4. Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté une méthode d'élargissement de BFI basé sur l'étude de la localisation de l'énergie sur la cellule élémentaire. Cette méthode nous a permis d'élargir la largeur relative de la BFI de S1, qui était de 45% à 90% en concevant la structure S2'. La transmission de cette structure pour cinq périodes montre une forte atténuation qui peut être utilisée afin de confiner spatialement les ondes élastiques. La poutre en silicium peut être structurée par des techniques de salle blanche. Les piliers de tungstène peuvent être collés ou bien d'autres matériaux compatibles avec les processus usuels de salle blanche peuvent être utilisés. Ces structures phononiques pourraient alors être produites industriellement et être utilisés comme ancrages de résonateurs [6] ou bien comme poutre de microscope à sonde locale afin d'améliorer leurs facteurs de qualité.

## 5. Bibliographie

- [1] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, A. Khelif, and P. A. Deymier, "Tunable filtering and demultiplexing in phononic crystals with hollow cylinders", *Physical Review E*, vol. 69, no 4, pp. 46608-1-6, 2004
- [2] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani, and V. Laude, "Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides", *Applied Physics Letters*, vol. 84, pp. 4400-4402, 2004.
- [3] M. S. Kushwaha, "Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise", *Applied Physics Letters*, vol. 70, pp. 3218-3220, 1997.
- [4] O. R. Bilal and M. I. Hussein, "Trampoline metamaterial: Local resonance enhancement by springboards", *Applied Physics Letters*, vol. 103, pp. 111901-1-4, 2013
- [5] D. Feng, D. Xu, G. Wu, B. Xiong, and Y. Wang, "Extending of band gaps in silicon based one-dimensional phononic crystal strips", *Journal of Applied Physics*, vol. 115, pp. 024503-1-7, 2014
- [6] F.-C. Hsu, J.-C. Hsu, T.-C. Huang, C.-H. Wang, and P. Chang, "Reducing support loss in micromechanical ring resonators using phononic band-gap structures", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, pp. 375101-1-10, 2011