



Title	Band Gap Engineering of GHz Phononic Crystals for Biosensor Applications
Author(s)	Yuan, Wenlou
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/96052
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (YUAN WENLOU)

Title

Band Gap Engineering of GHz Phononic Crystals for Biosensor Applications
(バイオセンサへの応用に向けたGHzフォノニック結晶のバンドギャップエンジニアリング)

Abstract of Thesis

Like natural crystals, where atoms are arranged by a certain periodicity, in phononic crystals (PnC), the inclusions are aligned with a certain period inside the matrix. They can show important and unique physical properties. For example, a mechanical band gap appears, in which acoustic waves are prohibited from passing through. Such an amazing characteristic allows the development of various acoustic devices. One promising application is the PnC sensor. PnC can provide nano-scale unit arrays with sub-ultraviolet wave interactions, which in principle, achieves high-sensitivity and multichannel biosensing. However, the sensitivity of existing PnC sensors is not high enough compared to other biosensors, because their sensing mechanism limits the sensitive area for target attachment and lowers the working frequency. In this thesis, I propose, fabricate, and measure the physical properties of a PnC biosensor with a new sensing mechanism by engineering the unusual transmission change at the bandgap edges.

To design the PnC biosensor, the mechanism of the bandgap in PnC is first clarified. After defining the boundary conditions, the dispersion and transmission of pillared PnC on a substrate are calculated by the finite element modeling (FEM) method. Interestingly, the transmission spectrum shows a sharp and asymmetric transmission change near the lower band gap edge, which is highly suitable for biosensing. To clarify the mechanism and control such unusual transmission change, I introduce the Fano resonance. Here, the asymmetric and sharp transmission change at the lower band gap edge is found to be the result of the coupling between SAW and pillar resonance. Moreover, the PnC unit number (i.e., the number of pillar rows) along the SAW propagation direction and the pillar mode are found to be the key factors that influence the Fano parameter, governing the shape of Fano resonance and controlling the transmission change.

Based on the Fano resonance of pillar-type PnC, I designed a PnC biosensor operated with picosecond ultrasonics. The GHz SAW is generated by the periodic stress between the gold nanostrips and the substrate. It passes through the PnC area and is detected by the probe light. The attached biomolecule targets shift the band gap edge and thus change the transmission of the SAW at the operating frequency so that they are detected by monitoring the transmission wave. Because of the sharp transmission change at the band gap edge, high sensitivity is expected. The mass-loading effect on the PnCs is studied by FEM, which shows the detection limit at the attogram level.

I fabricated the proposed PnC biosensor by using electron-beam (EB) lithography and radio frequency (RF) magnetron sputtering. The actual performance of the PnC biosensor is investigated using picosecond ultrasonics. The influence of the interface between strips and substrate is studied to precisely control the SAW generation. As a result, the clear Fano-shaped SAW transmission is observed. The experimental results match both theoretical calculation and FEM simulation. Also, the pump/probe lights are focused on the same point on the PnC, which shows the exitance of coupling between SAW and pillar resonance.

To reduce the surface wave leakage and further improve the sensitivity, a free-standing waveguide PnC biosensor is also proposed. The influence of the waveguide width is studied. It is shown that opening a small waveguide can create a single, isolated Lamb wave mode for biosensing. By designing the suitable waveguide width, both the high transmission and large transmission change with mass loading can be realized.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (YUAN WENLOU)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査 教授	荻 博次
	副 査 教授	森川 良忠
	副 査 教授	桑原 裕司
	副 査 教授	林 高弘
	副 査 教授	有馬 健太
	副 査 教授	山内 和人
	副 査 教授	渡部 平司
	副 査 教授	山村 和也

論文審査の結果の要旨

フォノニック結晶では、介在物が母材内で一定の周期で配列しており、巨視的に稀有な物理的特性を示す。例えば、フォノンバンドギャップが現れ、その周波数帯の音波は通過することができない。このような特性は、様々な音響デバイスの開発を可能とする。本論文では、フォノニック結晶を用いたセンサーについて探求している。バンドギャップの特異な性質を利用し、新しいセンシング原理に基づいたフォノニック結晶バイオセンサーを提案し、実際にデバイスの作製に成功している。

有限要素法 (FEM 法)により、基板上の多数のナノピラーを有するフォノニック結晶を提案し、その分散関係および透過率の周波数依存性を計算している。基板へ音響エネルギーが漏洩するバルク波モードと、基板表面に沿って伝播する表面波モードを分離し、表面弹性波においてバンドギャップが得られることを見出している。特に、バンドギャップの端部において、非対称でシャープな透過率変化が観測されることを発見し、これが、ファノ共鳴に起因することを突き止めている。つまり、表面弹性波（定常波）とナノピラー介在物の固有振動（局在モード）とのカップリングにより、バンドギャップの端部の非対称かつシャープな透過率変化が実現されることを見出した。

そして、この現象をバイオセンサーに適用することを提案している。GHz 帯の表面弹性波を励起し、金のナノピラーによって構成されるフォノニック結晶を用いる。金のナノピラー上にターゲット生体分子を付着させることにより、質量負荷効果によりバンドギャップのエッジをシフトさせることができ、表面弹性波の透過率を大きく変化させることが可能となる。この原理を利用したバイオセンサーを数値計算により再現したところ、アトグラムレベルの分子の検出が可能となることがわかった。そして、MEMS プロセスにより、実際のデバイスを作製し、ピコ秒超音波法により、設計したフォノニック結晶のバンドギャップ特性を実験的に検証することにも成功している。

以上の成果は、新たな超高感度バイオセンサーの開発に資するものであり、感染症や疾患の早期診断に貢献し得る。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。