

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630147

研究課題名(和文)フォノニック結晶を用いた高感度超音波センサ

研究課題名(英文)High-sensitive ultrasonic sensor using phononic crystal

研究代表者

岩本 敏 (Iwamoto, Satoshi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：40359667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：石英ガラスを用いた擬一次元フォノニック結晶が大きな完全フォノニックバンドギャップを有すること、縦波弾性波に対する高Q共振器が形成できることを見出した。この知見に基づき超音波ガラス加工を用いて作製した試料において、入射弾性波が共振器モードに共鳴した際に光弾性効果が大きく増強されることを観測することに成功した。この結果は、フォノニック結晶共振器を用いることで、微弱な超音波(弾性波)検出の高感度検出が実現できる可能性があることを示すものである。

研究成果の概要(英文)：We numerically investigated quasi-one-dimensional phononic crystal made of quartz glass and found that the structure can support a high Q cavity mode for quasi-longitudinal elastic wave within the large complete phononic band gap. By utilizing the strong confinement of the elastic wave in the cavity, we experimentally demonstrated the photoelastic effect is greatly enhanced when the incident elastic wave resonates with the cavity mode frequency in the sample made by ultrasonic machining processing. This result indicates that there is a possibility that high sensitivity detection of weak ultrasonic (elastic) wave can be realized by using phononic crystal cavities.

研究分野：ナノオプトエレクトロニクス

キーワード：フォノニック結晶 共振器 光弾性効果 弾性波 センサ

1. 研究開始当初の背景

超音波を用いた計測技術や工学から医療にわたる幅広い領域で利用されている。その検出感度の向上が実現されれば、これまで見えなかったものを可視化することを可能にするものであり、異常や病変の早期発見につながる。これまでも干渉計を活用した光計測技術の適用などが検討されているが、擾乱に弱いなどの問題も指摘されており、新たな視点での高感度化の試みが求められている。その一つの可能性として、フォノンニック結晶などによる超音波・弾性波の伝搬制御の活用が考えられる。

フォノンニック結晶とは弾性率（音響インピーダンス）の周期構造からなる人工構造である。フォトンニック結晶で高度な光制御が実現可能であると同様に、フォノンニック結晶を用いることで音波・弾性波の様々な制御が可能であり、その研究が活発化しつつある。その応用として、音響アイソレーションや音響フィルタなどが検討(参考文献①)されており、国内でも大型構造物の診断や音響レンズなどへの応用研究もスタートしている(科研費データベースより)。更に“センサ”への応用も報告(参考文献②③)されているが、透過スペクトルの変化から環境媒質の変化を検知しようとするものである。フォトンニック結晶中の微小共振器に光が強く局在するように、フォノンニック結晶共振器では超音波が局在し、歪場が大きく増強される。これを利用すれば微弱超音波の検出が可能になると考えられるが、超音波そのものの検出にフォノンニック結晶を応用しようとする検討は、進んでいない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、フォノンニック結晶共振器を用いた超音波センサの実現に向け、フォノンニック結晶共振器における歪み増強とその検出を目指す。また、フォノンニック結晶構造の有無による検出感度の変化を議論することで、本手法の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、超音波（弾性波）がフォノンニック結晶共振器に閉じ込められることにより生じる歪を検出する。そのために、共振器内で増強された歪を利用すると光と音波の相互作用を増大できる点に着目し、共振器内に誘起された歪場を、光弾性効果を用いて光学的に検出することとする。この手法は、歪で誘起された共振器内の複屈折による透過光の偏光回転を、偏光板を用いて強度信号に変換し検出するため、干渉計測に比べて、簡便な系で擾乱に強い検出が可能になると期待できる。

研究の当初計画は以下の通りある。初年度においては、フォノンニック結晶共振器の設計技術、歪みが誘起された場合の複屈折の解析技術の確立を図るとともに、材料とし

て想定するシリコンを用いたフォノンニック結晶共振器の設計を進める。特に光弾性効果の増強について、数値解析を元に検討する。初年度後半から第二年度前半に作製技術の開発を進める。具体的にはシリコン深堀加工の最適化と埋め込みプロセスの構築を進める。その後、素子の試作と評価を行い、本提案の有効性を示すことを目指す。

研究成果欄で示すとおり、研究の過程で石英ガラスを用いた擬一次元フォノンニック結晶構造が有望であることが見出されたため、実際の試作・評価は石英ガラスからなる擬一次元フォノンニック結晶共振器を用いて行った。

4. 研究成果

(1) 一次元シリコンフォノンニック結晶共振器の設計と光弾性効果の解析

まず、提案時に想定したシリコンを用いたフォノンニック結晶構造について、その共振器特性を光弾性効果の解析を行った。材料としてシリコンを選定したのは、近接外領域で透明であること、我々のグループにおけるこれまでの研究において作製技術が蓄積されていることに、加えて、我々の先行研究(参考文献④)において、フォノンニック結晶が実現できることが示されていたためである。解析には有限要素法(COMSOL)を用いた。

図1に構造の模式図を示す。フォノンニック結晶は(110)シリコンの貼り合せ構造で形成されており、図1左図に示すとおり、y軸に沿った結晶方位が[1-10]もしくは[001]となる層(AおよびB)を交互に積層した物構となっている。この構造では、横波弾性波（超音波）に対して各層の音速が異なる（音響インピーダンスが異なる）ため、フォノンニックバンドギャップが形成される。図1右図に示すとおり、中央のフォノンニック結晶部分とは厚みの異なるB層が共振器として機能する。図1左図には共振器共鳴周波数における弾性波の閉じ込めのイメージもあわせて示している。共振器内に強く閉じ込められた弾性波により、共振器部分で大きな歪みがかかる。この歪は、光弾性効果により複屈折が誘起する。共振器部分に直線偏光した光を入射すると誘起された複屈折を感じて、透過光の偏光は入射光の偏光から変化する。これを検出することで、弾性波を検出することが可能である。

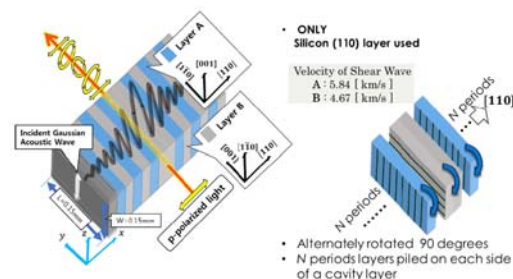


図1: (左図)シリコン一次元フォノンニック結晶共振器と光弾性効果を用いた検出の概念図。(右図)共振器部分の拡大図

図2はAおよびB層の厚みを $1\ \mu\text{m}$ 、共振器層の厚みを $2\ \mu\text{m}$ とした場合の構造の横波弾性波に対する透過スペクトルの計算結果である。共振器の両端は16周期のフォノンニック結晶構造を設定している。1.2-1.4GHzのバンドギャップ領域の中に鋭い透過ピークが表れている様子が見える。このピークは共振器モードに対応するので、その周波数は1.28GHz、 Q 値はおよそ4,000であった。

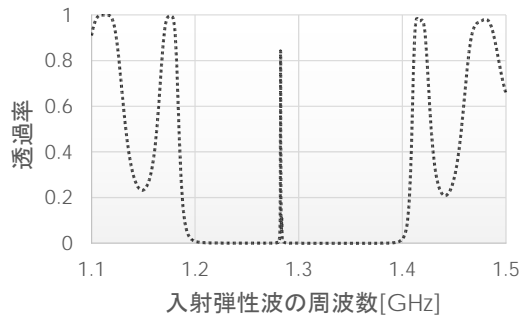


図2:有限要素法を用いて求めたシリコン一次元フォノンニック結晶共振器の透過スペクトル

共振器モード周波数の弾性波を入射した際の光弾性効果による偏光変調の様子を解析した。この構成では x 方向に直線偏光した光が共振器部分に誘起された複屈折でその偏光状態を変化させる。共振器部分の歪 e はテンソル量となるが、そのうち e_{zx} 成分が複屈折を生じる最も支配的要素である。入射直線偏光が一定の変化を得るのに必要となる弾性波の入力パワーを、共振器を挟むフォノンニック結晶の周期数 N の関数として示したものが図3である。この解析では、光の波長は $1.55\ \mu\text{m}$ 、光の進行方向に沿った素子の厚みは $150\ \mu\text{m}$ とした。投入パワーはフォノンニック結晶構造がない場合 ($N=0$) の場合で規格化されている。

図から明らかとなっており、周期数 N の増加に伴い、共振モードの Q 値は増大する。大きな Q 値は弾性波のより強い閉じ込めが可能であることを示すものであり、より低いパワーで同じ偏光状態の変化が実現できる。また、この結果は、フォノンニック結晶共振器を用いることで同じ超音波（弾性波）パワーでも大きな偏光変化が実現できることを示すものであり、超音波の高感度計測に利用できる可能性を示すものである。

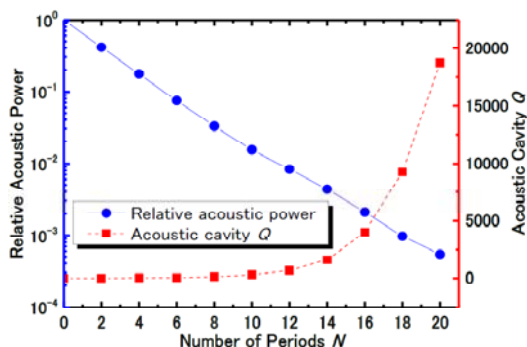


図3:フォノンニック結晶共振器の Q 値と一定の偏光変化を誘起するために必要な弾性波相対パワーのフォノンニック結晶周期数 N に対する変化

(2) 石英ガラス擬一次元フォノンニック結晶共振器の提案と設計

(1)で述べたシリコン貼り合せ構造は方位を 90 度回転させたシリコンを多数層貼り合わせる構成で、その作製は容易ではない。研究を進める過程で、棒状の石英ガラスを切削加工することで比較的簡便に実現できる構造を見出した。

本研究で提案した石英ガラス擬一次元フォノンニック結晶構造を図4に示す。図中右の拡大図に示すとおり、フォノンニック結晶部分の単位構造は弾性波の進行方向に垂直な断面積が異なる2種類のブロックで構成されている。この構成では、縦波弾性波に対する共振器モードを用いることで、図4に示すように 45 度に傾いた直線偏光を入射した場合に、その偏光状態が変化して出射される。

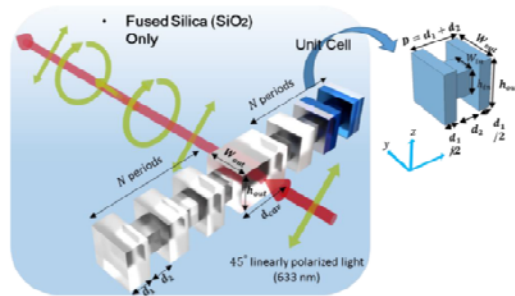


図4: 石英ガラスで構成された擬一次元フォノンニック結晶共振器構造の模式図

図5は、正方形の断面積を持つ構造に対するフォノンニックバンド構造(右図)と幾つかのモードのブリルアンゾーン端における変位場分布(左図)を示したものである。解析に用いたパラメータは $W_{\text{out}}=2W_{\text{in}}$ 、 $h_{\text{out}}=2h_{\text{in}}=D$ 、 $d_1=d_2=D/2$ である。規格化周波数 0.25 付近の平坦なバンドを挟んで広い領域で完全フォノンニックバンドギャップが形成されていることがわかる。更に縦波弾性波に対する広いストップバンドが存在し、その中心周波数(図中赤細線)が完全バンドギャップ内に位置するのが特徴である。また、断面の縦横比 (W/h) を変化させた際のフォノンニックバンドおよびバンドギャップ幅を詳細に調べた結果、断面形状が正方形の場合に最も広い完全バンドギャップが実現できることを明らかにした。

共振器部分の厚み d_{cav} を変化させながら縦

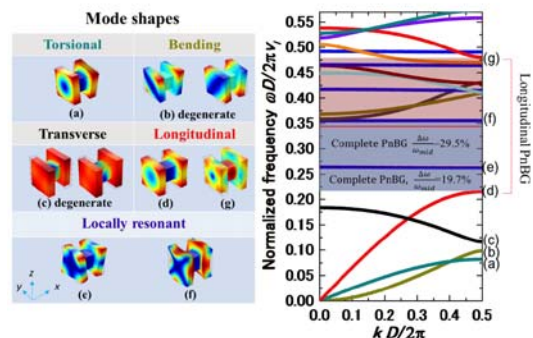


図5:正方形断面石英ガラス擬一次元フォノンニック結晶のバンド図(右)とモード変位分布(左)

波共振器モードの周波数と Q 値を評価した結果を図 6 に示す。完全フォノンバンドギャップ中で縦波ストップバンドの中心周波数(図中赤線)近傍に共振器モード周波数が位置するときに Q 値が高くなっていることがわかり、高 Q フォニック結晶共振器を利用するためには共振器部分の厚み制御が重要であることがわかった。石英ガラスからなる擬一次元フォニック結晶および共振器の設計、光弾性特性に対する検討結果の詳細については、学术论文(主要成果[雑誌論文]①)で報告している。

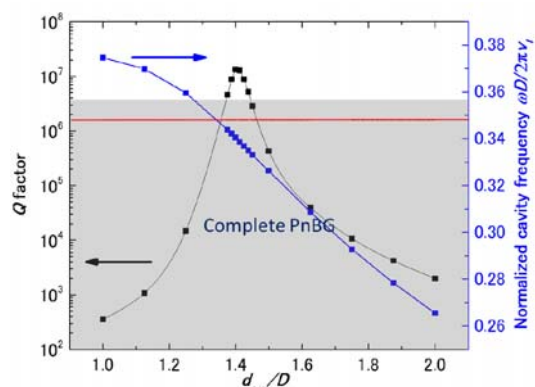


図 6: 縦波共振器モードの周波数とその Q 値の共振器部分の厚み依存性

(3) 石英ガラス擬一次元フォニック結晶共振器の作製と評価

(2)での知見にもとづき、実際に試料を作製しその光弾性特性を評価した。試料は超音波ガラス加工により作製した。構造パラメータの相対的關係は図 5 の解析に用いたものと同じであり、 $d_{cav}=1.45D$, $D=4\text{ mm}$ とした。この時の共振器周波数は $\sim 500\text{kHz}$ であった。共振器部分を挟むフォニック結晶の周期数 N を幾つか変えた試料を作製した。図 7 は $N=8$ の試料である。

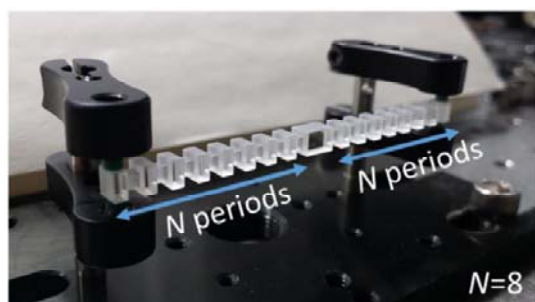


図 7: 超音波ガラス加工で作製した擬一次元フォニック結晶共振器

光弾性効果の測定は共振器部分に、試料長手方向に対して 45 度傾いた直線偏光レーザー(波長 633 nm)を入射し、試料と入射偏光と直交した透過軸を持つ偏光板を透過した光の強度を測定した。この光強度信号は共振器内に誘起された複屈折に起因する偏光変化量に対応する。この測定では、弾性波の周波数で変調された偏光状態はその 2 倍の周波数の強度変調として検出される。図 8 に測定結

果の一例を示す。上段は光検出器の出力信号であり、その周波数スペクトルが下段右である。予想されるとおり、励振周波数 500kHz の 2 倍周波数に相当する $\sim 1\text{MHz}$ で変調された光信号が得られていることがわかる。

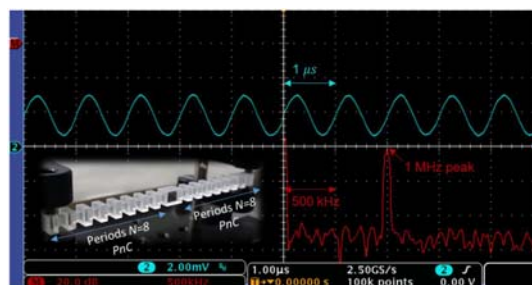


図 8: 石英ガラス擬一次元フォニック結晶共振器における光弾性効果の測定例

励振周波数を変えながら光強度(偏光状態)の変調強度を測定したところ、変調強度は共振器モード周波数で共鳴的に増大することを確認した。これは、光弾性効果がフォニック結晶共振器による弾性波の閉じ込め効果により増強されていることを示す結果である。さらに、周期数 N の異なる試料($N=4, 8$)およびフォニック結晶構造を有しない棒状石英ガラスのそれぞれについて、光弾性効果の大きさを特定したところ、フォニック結晶共振器の導入により、また周期数 N が大きくなるしたがって、変調効果が大きくなることを確認した。これらの結果は、フォニック結晶共振器の利用により微弱弾性波を高感度に測定できる可能性があることを示すものである(主要成果[学会発表]②⑨)

(4) 擬一次元フォトニック結晶におけるトポロジカル境界状態

図 4 で示した単位構造のパラメータを制御することで、同じバンドギャップを有しながら、そのトポロジカルな性質が異なる構造を実現できることを見出した。この二種類の構造を接合することで、バルク-エッジ対応の帰結として界面に境界状態が形成される。図 4 の擬一次元系ではこの境界状態は共振器として機能する。設計した素子を作製し、弾性波の透過率測定から、理論的に予測される境界状態が存在することを実験的に示した。(主要成果[学会発表]④⑤) また、(3)の実験手法を発展させた手法を用いて、境界状態の空間分布を測定することにも成功した。これらの結果は、固体中の弾性波に対するトポロジカル境界状態を初めて実現したものであり、今後、音響素子、弾性波デバイスと関連し、幅広い応用への展開が期待できる。

<参考文献>

- ① R. H. Olsson III and I. El-Kady, Meas.Sci. Technol. **20**, 012002 (2009).
- ② R. Lucklum et al. Proc. Engineering **25**, 787 (2011).

- ③ R. Lucklum and J. Li, Meas. Sci. Technol. **20**, 124014 (2009).
- ④ 浅野将生, 岩本敏, 荒川泰彦, 第 60 応用物理学会春季術講演物理学会 29P-PA7-17 (2013).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① I. Kim, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Design of quasi-one-dimensional phononic crystal cavity for efficient photoelastic modulation", Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 08RD02 (2016). DOI: 10.7567/JJAP.55.08RD02 (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① I. Kim, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Observation of topological interface state of elastic wave in a silica 1D Phononic crystal", 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2017), 3A33-1, Incheon, Korea (2017). 2017 年 7 月 27 日(発表予定)
- ② I. Kim, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Observation of enhanced photoelastic modulation using silica phononic crystal cavity", 21st Microoptocs Conference (MOC'16), David Brower Center, Berkley, California, USA (2016). 2016 年 10 月 12 日
- ③ (招待講演)S. Iwamoto, S. Takahashi, I. Kim, T. Tajiri, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Control of Light Polarization using Photonic and Phononic Crystals", Asia Communications and Photonics Conference (ACP2016), Shangri-La Hotel, Whuhan, China (2016). 2016 年 11 月 5 日
- ④ 金仁基、岩本敏、荒川泰彦, "一次元フォノンニック結晶における弾性波のトポロジカル境界状態", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟 (2016). 2016 年 9 月 15 日
- ⑤ 金仁基、岩本敏、荒川泰彦, "一次元フォノンニック結晶における弾性波のトポロジカル境界状態の観測", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、神奈川 (2017). 2017 年 3 月 15 日
- ⑥ I. Kim, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Design of Efficient Photo-Elastic Modulator using Quasi-1D Phononic Crystal Cavity", 20st Microoptocs Conference (MOC'15), 福岡国際会議場, Fukuoka, Japan (2015). 2015 年 10 月 27 日

- ⑦ I. Kim, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Design of Highly Efficient Photo-elastic Modulator Using Phononic Crystal Cavity", International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW2015), 東京大学駒場リサーチキャンパス, Tokyo, Japan (2015). 2015 年 8 月 4 日
- ⑧ 金仁基、岩本敏、荒川泰彦, "高効率光弾性変調器のためのシリカフォノンニック結晶共振器の設計", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、愛知 (2015). 2015 年 9 月 14 日
- ⑨ 金仁基、岩本敏、荒川泰彦, "シリカフォノンニック結晶共振器を用いた光弾性変調動作の実現", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、東京 (2016). 2016 年 3 月 22 日
- ⑩ 金仁基、岩本敏、荒川泰彦, "フォノンニック結晶共振器を用いた光弾性変調器の特性解析", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス、神奈川 (2015). 2016 年 3 月 22 日
- ⑪ (招待講演) S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Tailoring Optical Properties of Materials by Engineering the Environment", The 16th Kavli Future Symposium: Nanomaterials Science in Asian Perspective, Seoul National University, Seoul, Korea (2014). 2014 年 6 月 20 日

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 光弾性変調器
 発明者: 岩本敏、金仁基
 権利者: 東京大学
 種類: 米国仮出願
 番号: 62/119941
 出願年月日: 2015 年 2 月 24 日
 国内外の別: 外国

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
 岩本 敏 (IWAMOTO SATOSHI)
 東京大学・生産技術研究所・准教授
 研究者番号: 40359667
- (2) 研究分担者
 なし
- (3) 連携研究者
 なし
- (4) 研究協力者
 金 仁基 (KIM INGI)
 東京大学・大学院工学系研究科電気工学専攻・博士課程学生