

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03997

研究課題名(和文) GHz板状フォノンニックメタマテリアル及びプラズモニック・フォノンニック結晶の実現

研究課題名(英文) Implementation of GHz plate phononic metamaterials and plasmonic phononic crystals

研究代表者

友田 基信 (Tomoda, Motonobu)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：30344485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケールの厚みをもつ板状の固体を伝搬するGHz周波数領域の弾性波を、人工的なフォノンニック構造を使って以下のように制御した。微細加工技術で製作可能な曲げ振動ダブルネガティブフォノンニックメタマテリアルを設計し、シミュレーション上で負の屈折を確かめた。完全バンドギャップをもつ板状プラズモニック・フォノンニック結晶の設計をし、ナノスフェアリソグラフィ法によって試料作製をした。マイクロ球をガラス基板に敷き詰めたフォノンニックメタマテリアル構造上で弾性表面波をイメージングし、バンドギャップを持つことを確かめた。スプリットリング共振器構造における弾性振動による光反射率変化を計測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の弾性メタマテリアルの周波数帯よりも高いGHz周波数領域で動作するフォノンニックメタマテリアルが実現できることを、シミュレーションや試料作製、光学測定実験によって我々は示した。本研究は、フォノンニックメタマテリアルの新しい科学を切り開き、将来的にはMEMS(マイクロマシン)技術との融合させることによって、新しいマイクロスケールの振動制御などの研究につながるものである。

研究成果の概要(英文)：We controlled GHz elastic waves propagating on plates with nanoscale thickness using artificial phononic structures as follows. We designed double negative flexural wave metamaterials and simulated negative refractions. We designed a plasmonic phononic crystal with perfect phononic bandgap. We imaged surface acoustic waves on a microsphere-based elastic metamaterial structure. We measured reflectivity change on split ring resonators due to mechanical vibrations.

研究分野：超音波物性、光物性

キーワード：メタマテリアル フォノンニック結晶 プラズモニクス Lamb波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、異なる音響特性をもつ物質を周期的に配置した人工結晶であるフォノンニックメタマテリアルやフォノンニック結晶が注目されている。これらの構造を使って弾性波の伝搬を制御することで、負屈折、スーパーレゾナンス、クローキングなどの現象の実現や、フィルタデバイス、防音耐震材、熱伝導制御などへの応用が期待されている。フォノンニックメタマテリアルにおいて、電磁メタマテリアルの負の誘電率や負の透磁率に対応する概念は、負の有効質量密度と負の有効弾性率である。これらは弾性波の波長に対して十分に小さな周期的内部構造が固有振動を持つ場合に、その固有振動よりもわずかに高い周波数の弾性波が通過したときに逆位相の共振が起こることで実現される。共振周波数近傍ではわずかな力で大きな振幅が得られるためあたかも質量密度が軽くなったように振る舞い、共振周波数よりもわずかに高い周波数では力の向きと加速度の向きが逆になって振動するために負の有効質量密度が実現される。負の有効弾性率は体積要素がねじれ振動をする共振周波数近傍で実現される。本研究の研究分担者である Wright は海外共同研究者であるフランスの Le Mans 大学の Gusev 教授と共に、板波の曲げ振動において負の質量密度と負の弾性率を併せ持つ条件について示した理論論文 (V. E. Gusev and O. B. Wright, *New J. Phys.* **16**, 123053 (2014)) を発表した。また、もう一つの研究目的である板状の 2 次元プラズモニック・フォノンニック結晶については、申請者達のグループが独自に開発した弾性表面波時間分解イメージング技術を用いた、GHz 周波数帯のフォノンニック結晶の研究や、音響波による表面プラズモン・ポラリトンを利用した光反射率変化の増強についての研究から着想を得ている。申請者達は過去にプラズモニック・フォノンニック結晶の研究も行っているが、その構造は完全フォノンニックバンドギャップを持たなかった (T. A. Kelf, et al., *New J. Phys.* **16**, 023013 (2013))。本研究では、完全バンドギャップのフォノンニック結晶構造に閉じ込められた弾性振動を、プラズモニック結晶を利用して検出感度を増強して測定する研究である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ナノメートルスケールの厚みをもつ板状の固体を伝搬する GHz 周波数領域の弾性波を、人工的なフォノンニック構造を使って制御することである。特にどのスケールでも未だ実現されていない板の曲げ振動波に対して負の有効質量密度と負の有効弾性率を併せ持つダブルネガティブフォノンニックメタマテリアルを世界で最初の実証する。申請者のグループが開発した GHz 領域の固体表面波の時間領域イメージング技術を用いて、このスケールで初めて負の屈折などメタマテリアルに特有の現象を可視化する。さらに、完全フォノンニックバンドギャップとプラズモニック共振構造を同時に併せ持つ板状の 2 次元プラズモニック・フォノンニック結晶構造も実現し、その物理学的な特徴を明らかにする。以下の研究を行う。

- ① 微細加工技術で製作可能な曲げ振動ダブルネガティブフォノンニックメタマテリアルの設計と、弾性表面波伝搬のシミュレーション
- ② 完全バンドギャップをもつ板状プラズモニック・フォノンニック結晶の設計および作製
- ③ マイクロ球をガラス基板上に敷き詰めたフォノンニックメタマテリアル構造上の弾性表面波伝搬のイメージング
- ④ スプリットリング共振器構造における弾性振動による光反射率変化

3. 研究の方法

本研究では、サブマイクロンスケールの板状構造を使って、フォノンニックメタマテリアルとプラズモニック・フォノンニック結晶を作製し、弾性波のイメージングを行うことを目的とする。試料の設計においては、市販のパッケージソフトである COMSOL MultiPhysics を使ったシミュレーションを利用する。弾性波伝搬の実験は、フェムト秒レーザーを使ったポンプ・プローブ法を基に申請者達が開発した GHz 周波数領域の任意周波数時間分解弾性表面波イメージング法を用いる。

4. 研究成果

- (1) 微細加工技術で製作可能な曲げ振動ダブルネガティブフォノンニックメタマテリアルの設計と、弾性表面波伝搬のシミュレーション

GHz 周波数の板波を狙うためには、板の厚みが $1\mu\text{m}$ 以下であり、構造の周期も $1\mu\text{m}$ でなければならない。既存の MEMS プロセスの半導体微細加工技術を利用できる SOI ウェハで作成可能な Si の単結晶膜を念頭に設計を行った。設計には、三角格子および正方格子となるようなダブルネガティブの基本構造を考案し、そのパラメータを COMSOL MultiPhysics を利用して決定した。構造周期が波長よりも十分に短くなり均質的な有効パラメータが定義できる狭義な弾性メタマテリアルは、既存の半導体プロセスの



図 1. 負の屈折を起こすシリコン薄板フォノンニックメタマテリアル構造の例

利用という条件の元では考案できなかったが、構造周期が波長よりも小さくなり、構造の並進運動と回転運動の共振を同じ周波数に設定できる広義の弾性メタマテリアルについては、実際のプロセスで作製できるであろう構造を設計できた(図1)。この構造については、シミュレーション上でもダブルネガティブメタマテリアルの特徴である群速度と位相速度の符号が逆転することを確認し、負の屈折のシミュレーションも行った。この研究成果については、応用物理学会や日本物理学会、またいくつかの国際学会で発表している。試料作製は、研究協力者である東京大学生産技術研究所の野村政宏准教授のグループに依頼中であり、試料完成後に弾性波伝搬イメージングの実験に取り掛かる予定である。

(2) 完全バンドギャップをもつ板状プラズモニック・フォノンニック結晶の設計および作製

大きさのそろった直径数百 nm のポリスチレンビーズを水面上に一層に浮かべたものを、平らな試料表面上に移すと、大面積の三角最密構造を持つ一層ポリスチレン配列ができる。それを乾燥させ、金を蒸着させた後にポリスチレン球の層を取り除くと、ハニカム配列した金のナノピラー群を作製することができる。この方法はナノスフェアリソグラフィ法とも呼ばれる。このナノスフェアリソグラフィ法を使って、シリコンナイトライド薄膜の上に金のナノピラーを周期的に並べると、プラズモニック結晶を作ることができる。申請者達は、シリコンナイトライド薄膜の厚みやナノピラーの高さを調節すると、この試料が完全フォノンニックバンドギャップを持つことを発見した。ナノスフェアリソグラフィの技術を持つ北海道大学理学研究院の南本大徳助教との共同研究で、プラズモニック・フォノンニック結晶試料の作製を行っている。現在は、試料作製、原子間力顕微鏡による試料状態の確認、ポンププローブ法による構造の共振周波数の確認を繰り返して、シミュレーションに合わせた試料作製を行っている段階である。

また本研究に付随して、シリコンナイトライド薄膜に金属膜を一樣に蒸着した試料を使って、伝搬する弾性波(Lamb波)をイメージングした(図2)。Lamb波は、特定の周波数で群速度がゼロになり振動が空間的に広がらないゼロ群速度を持つ。我々は世界で初めてゼロ群速度の弾性波を実時間でイメージングし、その結果を Nature Communication 誌に論文発表した。

(3) マイクロ球をガラス基板上に敷き詰めたフォノンニックメタマテリアル構造上の弾性表面波伝搬のイメージング

大きさがそろったガラスビーズをガラス基板上に敷き詰めると、ガラスビーズと基板の間のファンデルワールス力による結合が弱いために、結合がバネでガラスビーズが質点となり、その共振周波数ではシングルネガティブフォノンニックメタマテリアルとして表すことができる(図3)。我々はこのメタマテリアル試料上を伝わる弾性表面波をイメージングして、共振周波数ではバンドギャップを持ち弾性表面波が伝搬しないことを確かめた。この成果は、New Journal Physics 誌に発表した。

(4) スプリットリング共振器構造における弾性振動による光反射率変化

金属微細構造でできた Split ring resonator は最も代表的な光学的メタマテリアルである。金でできたナノスケールのスプリットリング共振器を並べた試料上に弾性振動を励起すると、その光学的な性質つまり光反射率が変化することを、実験およびシミュレーションで示した(図4)。プローブ光の偏光依存性を測定することで、スプリットリング共振器内部にプラズモンによる電場の閉じ込めが光反射率の振動を増強することを発見した。この成果は、Nano Letters 誌に発表した。

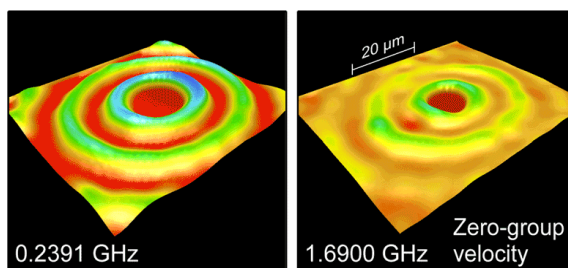


図2. 外に広がる通常のLamb波(左)と、空間内に留まるゼロ群速度の際のLamb波(右)の振動波形。

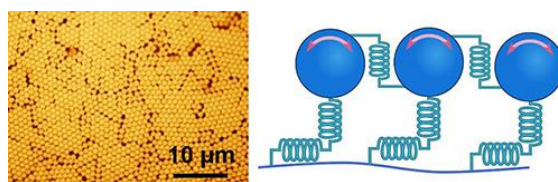


図3. 直径1ミクロンのガラスビーズからなる試料の光学顕微鏡像(左)と、メタマテリアルの振動を表すモデル(右)。

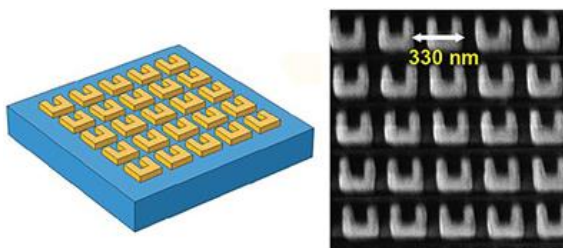


図4. スプリットリング共振器試料(左)。ガラス基板上に金でできた共振器が並んでいる。その電子顕微鏡写真(右)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① Q. Xie, S. Mezil, P. H. Otsuka, M. Tomoda, J. Laurent, O. Matsuda, Z. Shen, and O. B. Wright, "Imaging gigahertz zero-group-velocity Lamb waves," *Nature Communications*, Vol. 10, pp. 22228-1-7 (2019) DOI:10.1038/s41467-019-10085-4 (査読あり)
- ② O. H. Otsuka, S. Mezil, O. Matsuda, M. Tomoda, A. A. Maznev, T. Gan, N. Fang, N. Boechler, V. E. Gusev, and O. B. Wright, "Time-domain imaging of gigahertz surface waves on an acoustic metamaterial," *New Journal of Physics*, Vol. 20, pp. 013026-1-12 (2018) DOI:10.1088/1367-263-/aa9298 (査読あり)
- ③ S. Mezil, K. Fujita, P. H. Otsuka, M. Tomoda, M. Clark, O. B. Wright, and O. Matsuda, "Active chiral control of GHz acoustic whispering-gallery modes," *Applied Physics Letters*, Vol. 111, pp. 144103-1-4 (2017) DOI:10.1063/1.4994886 (査読あり)
- ④ Y. Imade, R. Ulbricht, M. Tomoda, O. Matsuda, G. Seniutinas, S. Juodkakis, and O. B. Wright, "Gigahertz optomechanical modulation by split-ring-resonator nanophotonics meta-atom arrays," *NANO Letters*, Vol. 17, pp. 6684-6689 (2017) DOI:10.1021/acs.nanolett.7b02663 (査読あり)
- ⑤ R. Ulbricht, H. Sakuma, Y. Imade, P. H. Otsuka, M. Tomoda, O. Matsuda, H. Kim, G. -W. Park, and O. B. Wright, "Elucidating gigahertz acoustic modulation of extraordinary optical transmission through a two-dimensional array of nano-holes," *Applied Physics Letters*, Vol. 110, pp. 91910-1-5 (2017) DOI:10.1063/1.4977430 (査読あり)
- ⑥ S. Mezil, K. Chonan, P. H. Otsuka, M. Tomoda, O. Matsuda, S. H. Lee, and O. B. Wright, "Extraordinary transmission of gigahertz surface acoustic waves," *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 33380-1-11 (2016) DOI:10.1038/srep33380 (査読あり)

〔学会発表〕 (計 42 件)

- ① 藤田健太郎、友田基信、Oliver B. Wright、松田理、柳澤亮人、野村政宏「反転対象性の破れた二次元音響メタマテリアルによる GHz 音響波の伝播制御」第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、2018 年 9 月名古屋国際会議場 (口頭発表)
 - ② M. Tomoda, K. Fujita, K. Inagaki, O. Matsuda, O. B. Wright, and V. E. Gusev, "Simulation of gigahertz plate waves in elastic metamaterials," *International Congress on Ultrasonics (ICU2017)*, Hawaii, Dec. 2017 (口頭発表)
 - ③ P. H. Otsuka, S. Mezil, V. E. Gusev, O. Matsuda, M. Tomoda, T. Gan, N. Boechler, A. A. Maznev, N. Fang, and O. B. Wright, "Ultrafast imaging of acoustic wave propagation in microsphere-based metamaterial structures," *META'17 the 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Incheon, Korea, July, 2017 (招待講演)
 - ④ 稲垣敬介、友田基信、Vitalyi Gusev、松田理、Oliver B. Wright「負の有効密度および負の有効体積弾性率をもつ板の曲げ振動波の音響メタマテリアル」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月パシフィコ横浜 (口頭発表)
 - ⑤ Y. Imade, R. Ulbricht, M. Tomoda, O. Matsuda, G. Seniutinas, S. Juodkakis, and O. B. Wright, "Ultrafast acoustic modulation of a split-ring-resonator metamaterial," *5th International Symposium on Laser-Ultrasonics and Advanced Sensing (LU2016)*, Linz, Austria, July 2016 (口頭発表)
- 他 37 件

〔図書〕 (計 1 件)

- ① M. R. ハーバーマン、M. D. ギルド、友田基信 訳、「音波を操る 音響メタマテリアル」パリティ 2017 年 3 月号、pp. 12-19、丸善 (翻訳記事)

〔その他〕

ホームページ <http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：O・B Wright
ローマ字氏名：(WRIGHT, Oliver B.)
所属研究機関名：北海道大学
部局名：大学院工学研究院
職名：教授
研究者番号：90281790

研究分担者氏名：松田 理
ローマ字氏名：(MATSUDA, Osamu)
所属研究機関名：北海道大学
部局名：大学院工学研究院
職名：准教授
研究者番号：30239024

(2)研究協力者

研究協力者氏名：Paul H. Otsuka
北海道大学・大学院工学研究院・研究員

研究協力者氏名：Sylvain Mezil
北海道大学・大学院工学研究院・JSPS 海外特別研究員

研究協力者氏名：南本 大穂 (MINAMIMOTO, Hiro)
北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究協力者氏名：野村 政宏 (NOMURA, Masahiro)
東京大学・生産技術研究所・准教授

研究協力者氏名：Vitalyi E. Gusev
フランス Le Mans 大学・ルマン大学音響研究所・教授

研究協力者氏名：Olwaseyi Balogun
アメリカ合衆国 Northwestern 大学・McCormick 工学院・准教授

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。