

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560052

研究課題名(和文) 3次元フォノンニック結晶を利用した高性能くさび型音響導波路の設計

研究課題名(英文) Optimization of high-performance wedge-type waveguides to use three-dimensional phononic crystals

研究代表者

田中 之博 (TANAKA, YUKIHIRO)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00281791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、無フォノン環境を可能にする3次元フォノンニック結晶と、厚さが冪関数で変化するくさび型導波路における音響波エッジモードの解析を行った。3次元フォノンニック結晶は、面心立方構造と六方最密構造をもつ人工オパールを想定し、FDTD法を用いて分散関係を計算した。その結果、どちらの構造においても、バンドギャップが出現した。しかし、オパールを形成するシリカ球同士の結合度を大きくすると、そのギャップは消失する。厚さが冪関数で変化する楔型導波路においては、冪の増加とともに、弾性波が楔の先端部分に強く局在するようになり、その滞在時間が増加する。この結果は、高効率の導波路モード実現のためには有効な情報である。

研究成果の概要(英文)：We have investigated elastic waves in three-dimensional(3D) phononic crystals which achieve no-phonon environment and edge modes in a wedge-type waveguide whose thickness is varying as a power function of the distance from the top of the wedge. The 3D phononic crystals are composed of arrays of silica spheres with face-centered cubic and hexagonal close-packed structure which are called 'synthetic opals' and we used an FDTD method to calculate the dispersion relations of elastic waves. As a result, we found band gaps in both the structures. However, the gaps disappear with the increase in sintering parameter which represents the overlap of the adjacent spheres. In wedge-type waveguides, we found that, the increase in the power makes the elastic waves localize to the edge part of the wedge strongly and the dwell time of the edge modes increases. Our results will give valuable information for the realization of high-performance waveguide mode.

研究分野：固体物理学、フォノン物性

科研費の分科・細目：工学、応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：フォノンニック結晶 導波路モード 弾性波 分散関係 周波数ギャップ バンド構造 くさび

1. 研究開始当初の背景

ナノスケールで駆動するデバイス素子は、そのほとんどがトンネル効果やスピン散乱などを利用した量子力学的干渉効果を活用する。よって、その機能を引き出すためには、この干渉を破壊する非弾性散乱、すなわち、ジュール熱等によるフォノン散乱を取り除く必要がある。このことを実現するためには、発生した熱を素早く動作回路上から空間的に離れた場所に逃がさなければならず、熱を極めて小さな領域に閉じ込めながら伝播させる導波路が不可欠となる。

くさび型導波路とは、基盤上に断面が矩形や三角形の突起状の構造をもつ導波路をいう。近年、厚さが端からの距離の関数としてべき乗で変化するくさび型導波路中の弾性波が、その端で反射無く伝播するという音響ブラックホール現象が Krylov らによって提唱された。しかし、実際には、くさび型導波路は基盤上に取り付けられているため、不可避的な漏れが生じ、弾性エネルギーは基盤中に逃げてしまう。

そこで、我々は、基盤として、完全周波数ギャップをもつ3次元フォノンニック結晶を用いることにより、その漏れを抑制し、従来のものより高性能な導波路の確立を目指す。このようなフォノンニック結晶を利用したくさび型導波路の開発は、次世代を担う量子ナノデバイスの実用化に大きく貢献する研究である。

2. 研究の目的

本研究は、無フォノン環境を可能にする3次元フォノンニック結晶基盤と、その上に設置した厚さが冪関数で変化するくさび型導波路における音響波エッジモードの解析を行う。通常、基盤に取り付けられた導波路におけるエッジモードは、基盤に向かってエネルギーが散逸し、導波路としての機能が損なわれる。そこで、本研究では、基盤として3次元フォノンニック結晶を用いることによって、このエネルギー散逸を抑制し、より効果的にエッジモードの閉じ込めを達成させる。さらに、くさび型導波路の形状パラメータの最適化を行い、導波路としての機能向上を目指す。この研究の成果は、音響波に限らず、ナノデバイスにおける熱の制御への応用も期待され

る。

3. 研究の方法

(1) 3次元フォノンニック結晶におけるフォノン分散関係の数値計算を実行する。特に、3次元周期構造として注目を集めているオパールについて調べる。計算方法は、基本的には時間領域有限差分法(FDTD法)およびスーパーセル平面波展開法を適用する。オパールの構造は、シリカ球が互いに焼結して面心立方(FCC)または六方最密(HCP)構造を形成しているため、その結合の強さが重要なパラメータとなる。そこで、周波数ギャップが最も大きくなるパラメータの最適化を行うために、オパールにおけるフォノン分散関係の計算を行う。

(2) 厚さが端からの距離の冪関数で変化するくさび型導波路におけるフォノンモード(特に、厚さ方向において尖端部分に強く局在したモードをエッジモードと呼ぶ)の解析を行う。解析の手段としては、数値計算としてFDTD法および散乱行列法を用い、厚さが冪関数で変化するくさび型導波路のエッジモードの解析に適用する。くさび型導波路においては、次の事柄について系統的な解析を行う。

冪関数で変化する厚さの指数に依存したエッジモードの振る舞い

端からの距離を x とすると、その冪関数として変化する導波路の厚さは、 $h(x) = \varepsilon x^s$ と書ける。KrylovらのWKB法を用いた解析によると、 $s \geq 2$ で音響ブラックホール現象が起こると予期されている。ここでは、実際にその現象が起こるのかどうかを、現実のくさび構造に近いモデルを用いて解析する。 s をパラメータとして、エッジモードが尖端に局在する最適な値を求める。さらに、もう一つのパラメータとして、係数 ε も存在する。これについても系統的に変化させ、エッジモードの振る舞いを調べる。

尖端の厚みによるエッジモードの振る舞い

実際の導波路においては、尖端部分の厚さはゼロとはならず、有限な大きさを持たざるを得ない。Krylovらの解析は、尖

端部分の厚さがゼロの極限での計算であるため、有限な厚みの効果によってエッジモードがどのように変調されるかを調べる必要がある。

導波路がどのような物質で作製されるかは、導波路設計においては重要なパラメータである。ここでは、バルク結晶中の弾性波に対する異方性因子の異なる物質を選び、エッジモードの有無、局在長などを調べる。

4. 研究成果

(1) 3次元フォノン結晶としてオパールを想定し、音響波に対するバンド計算を行い、バンドギャップが大きくなるように物質パラメータの最適化を行った。オパールは球状の二酸化シリコンが最密構造をとるように積み重なって形成される物質であり、3次元フォノン結晶を構成する。バンドギャップの大きさを決定するパラメータは、二酸化シリコン球同士の接触具合(焼結パラメータと呼ぶ)であり、これを連続的に変化させることによって、バンドギャップの大きさを計算した。

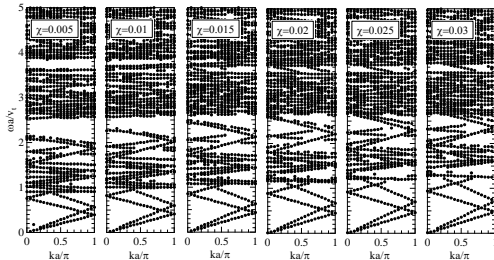


図1：面心立方格子構造の人工オパールに対する[111]方向の分散関係。焼結パラメータが小さいと大きなギャップが得られ、大きくなるにつれてギャップが消失する。

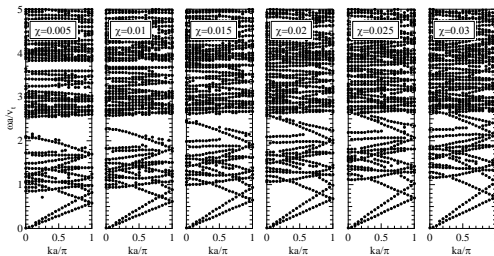


図2：六方最密構造の人工オパールに対するc軸方向の分散関係。焼結パラメータが小さいと大きなギャップが得られ、大きくなるにつれてギャップが消失する。

図1に示すように、得られた結果は、焼結パラメータが小さければ第一バンドギャップは単調に大きくなり、完全バンドギャップを形

成することを見出した。また、図2に示すように六方最密構造をとった場合の計算も行ったが、これも同様に、焼結パラメータを小さくすることによって、単調に大きくなるバンドギャップを得た。

(2) 楔の先端が有限の幅を持つ場合、導波路モードは有限の時間だけ近傍にとどまることができるが、その滞在時間(位相時間)を、Timoshenkoモデルを用いて評価した。図3に示すように、べき数が大きくなるにしたがって、滞在時間は長くなることを見出した。また、先端の有限幅の大きさに対しても滞在時間が大きく依存することを示した。

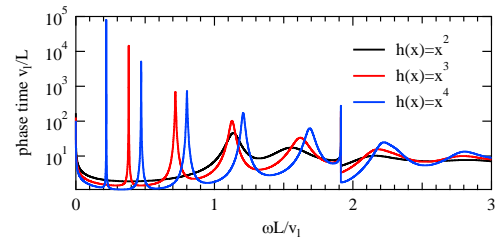


図3：べき数の異なる楔に対する弾性波の先端部分における滞在時間(位相時間)の周波数依存性。べきが大きくなるにつれて位相時間のピーク値が大きくなり、滞在時間が長くなることを示している。

(3) 3次元空間における弾性体の運動方程式を、FDTD法を用いて解き、先端部分での変位ベクトルの周波数スペクトルを求めた。得られたスペクトルピークの位置と幅から固有振動数とその寿命の見積もることができる。図4に示すように、その場合においてもTimoshenkoモデルと同様に、べき数が大きくなるに従い、固有振動数が低周波数側にシフトし、寿命が長くなることを見出した。その結果、導波路モードになる可能性をもつモードが、低周波数領域において、たわみモードのみであることを確かめた。また、伝播方向の波数ベクトル依存性を見ると、固有振動モードは波数ベクトルの大きさが大きくなるに従い、くさびの先端にエネルギーを集中させ、長い寿命を持つことがわかる。これらの結果は、導波路の設計の際に有用になると期待される。

(4) 3次元フォノン結晶が実際に人工オパールであることを想定し、粘性をもつ液体(水やグリセリンを想定)中に並べられたシリカ球に対するバンド計算を実施した。

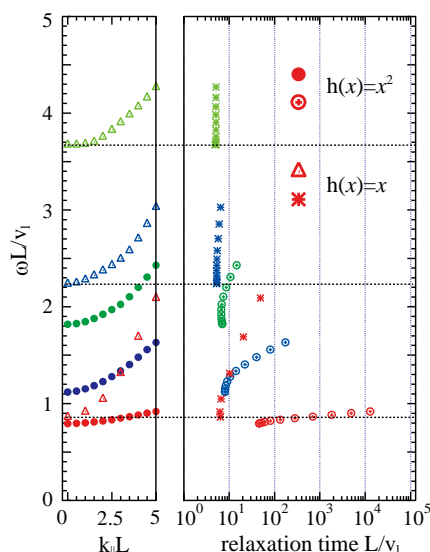


図4：線形の楔と冪数2の先端形状をもつ楔の分散関係と緩和時間の周波数依存性。

粘性は、近似的に弾性定数を複素数に拡張することで取り込むことができる。この際、その虚数部分は周波数に比例すると仮定する（粘性抵抗力のはたらく流体モデル）。使用した方法は、平面波展開法であり、弾性定数が周波数に依存するために、得られた固有値方程式は、周波数について二次の非線形方程式となる。図5に示すように、粘性率が比較的小さい場合、バンド構造中にバンドギャップ（斜線部）が出現したが、粘性率を大きくするに従って、バンド構造中に不安定なバンドが出現し、周波数ゼロ近傍に多くのバンドが現れた。また、方程式を解くことによって得られた周波数は、複素数となるが、その虚数部分は、弾性波の減衰率を表す。結果として得られた減衰率は、周波数が大きいほど大きな値をとり、この系を伝播する弾性波は、時間とともに急激に消失してしまうことがわかる。この結果は、導波路の基板となるフォノンニック結晶を比較的小さい粘性の大きい液体（グリセリン等）を用いて作製した場合、導波路から漏れ出した弾性波はすぐに減衰してしまうので、高性能な導波路の作製には適さないことがわかる。水のような粘性の小さな液体に関しては、依然としてバンドギャップが存在するので、その周波数帯からなる導波路中の弾性波は、たとえ漏れ出たとしても、基板であるフォノンニック結晶に形成したバンドギャップにより減衰が抑えられることになる。

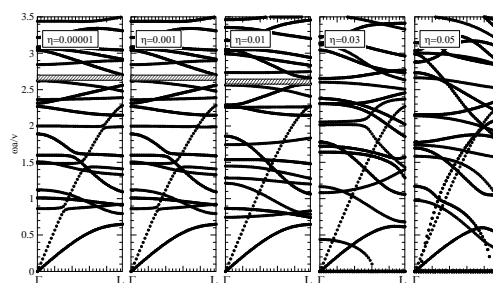


図5：シリカ球と粘性流体からなる3次元フォノンニック結晶（FCC構造）における弾性波の分散関係。

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 3件)

T. A. Kelf, Y. Tanaka, O. Matsuda, E. M. Larsson, D. S. Sutherland, and O. B. Wright, Ultrafast vibrations of gold nanorings, 査読有, Nano Letters, 11, 3893-3898(6 pages), 2011

S. Danworaphong, T. A. Kelf, O. Matsuda, M. Tomoda, Y. Tanaka, N. Nishiguchi, O. B. Wright, Y. Nishijima, K. Ueno, S. Juodkazis, and H. Misawa, Real-time imaging of acoustic rectification, 査読有, Appl. Phys. Lett. 99, 201910 (3pages), 2011

Y. Tanaka, T. Murai, and N. Nishiguchi, Rectification of elastic waves in a thin plate, 査読有, J. Appl. Phys. 111, 024507 (7 pages), 2011

〔学会発表〕(計 14件)

田中之博, 2つの異方性媒質からなるフォノンニック結晶界面における界面弾性波, 口頭発表, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市), 2014年3月18日

河野大地, 田中之博, 西口規彦, 矩形断面ワイヤーを用いた音響波の整流, 口頭発表, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学(神奈川県厚木市), 2013年3月28日

當田勝則, 田中之博, 西口規彦, 2準位系-フォノン相互作用が及ぼす量子細線における熱伝導率の温度依存性, 口頭発表, 第48回応用物理学会北海道支部/第9回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 釧路市生涯学習センター「まなぼっと幣舞」(北海道釧路市), 2013年1月10日

河野大地, 田中之博, 西口規彦, ナノワイヤーにおける音響波の整流, 口頭発表, 第 48 回応用物理学会北海道支部/第 9 回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 釧路市生涯学習センター「まなぼっと幣舞」(北海道釧路市), 2013 年 1 月 10 日

大柏宣栄, 田中之博, 西口規彦, 異なる二つの 2 次元フォノンニック結晶界面を伝播する弾性波の解析, 口頭発表, 第 48 回応用物理学会北海道支部/第 9 回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 釧路市生涯学習センター「まなぼっと幣舞」(北海道釧路市), 2013 年 1 月 10 日

小林翔悟, 田中之博, 西口規彦, 円錐形散乱体を用いた 3 次元音響波整流器, 口頭発表, 第 48 回応用物理学会北海道支部/第 9 回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 釧路市生涯学習センター「まなぼっと幣舞」(北海道釧路市), 2013 年 1 月 10 日

Katsunori Toda, Yukihiro Tanaka and Norihiko Nishiguchi, Temperature dependence of thermal conductivity in nanowires due to interaction between two-level systems and phonons, 口頭発表, The 3rd Hokkaido Univ. - Chungbuk National Univ. Joint Symposium on Sustainable Engineering, 北海道大学(北海道札幌市), 2012 年 8 月 29 日

Daichi Kono, Yukihiro Tanaka and Norihiko Nishiguchi, A diode for acoustic waves, 口頭発表, The 3rd Hokkaido Univ. - Chungbuk National Univ. Joint Symposium on Sustainable Engineering, 北海道大学(北海道札幌市), 2012 年 8 月 29 日

Nobuharu Okashiwa, Yukihiro Tanaka and Norihiko Nishiguchi, Interfacial Elastic Waves Propagating along the interface in a Dual Two-dimensional Phononic-Crystal System, 口頭発表, The 3rd Hokkaido Univ. - Chungbuk National Univ. Joint Symposium on Sustainable Engineering, 北海道大学(北海道札幌市), 2012 年 8 月 29 日

Shogo Kobayashi, Yukihiro Tanaka and Norihiko Nishiguchi, A three-dimensional acoustic-wave rectifier using conical scatterers, 口頭発表, The 3rd Hokkaido Univ. - Chungbuk National Univ. Joint Symposium on Sustainable Engineering, 北海道大学(北海道札幌市), 2012 年 8 月 29 日

當田勝則, 田中之博, 西口規彦, 2 準位系 - フォノン相互作用が及ぼす量子細線における熱伝導率の温度依存性, ポスター発表, 第 33 回超音波エレクトロニクス

の基礎と応用に関するシンポジウム, 千葉大学西千葉キャンパス けやき会館(千葉県千葉市), 2012 年 11 月 15 日

河野大地, 田中之博, 西口規彦, ナノワイヤーにおける弾性波の整流, ポスター発表, 第 33 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 千葉大学西千葉キャンパス けやき会館(千葉県千葉市), 2012 年 11 月 15 日

大柏宣栄, 田中之博, 西口規彦, 異なる二つの 2 次元フォノンニック結晶界面を伝播する界面波の解析, ポスター発表, 第 33 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 千葉大学西千葉キャンパス けやき会館(千葉県千葉市), 2012 年 11 月 15 日

田中之博, 2 次元フォノンニック結晶層における表面弾性波の伝播特性, ポスター発表, 第 32 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 京都大学百周年時計台記念館(京都市), 2011 年 11 月 10 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://ssp-ap.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 之博 (Tanaka Yukihiro)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 00281791

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし