

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13270

研究課題名（和文）光波制御技術の伝熱工学への応用可能性の探求

研究課題名（英文）Application of light wave controlling technology to thermal conduction engineering

研究代表者

野村 政宏（Nomura, Masahiro）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：10466857

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：フォトンとフォノン類似性があるため、より高度に発展した光波制御技術を、フォノン制御によって熱流を制御する伝熱工学に応用することで、新展開をもたらすことが期待できる。本研究では、フォノン結晶とよばれる人工周期構造を用いて、フォノンが本来持つ波動性を積極的に利用した熱伝導制御に挑戦した。

その結果、4Kにおいて完全な周期性を有するフォノン結晶と、その周期性を乱した構造で熱伝導率が異なることを観測し、フォノンの波動性に基づいた熱伝導率制御を世界で初めて明確に示すことに成功した。この結果は、固体物理学におけるマイルストーン的成果である。

研究成果の概要（英文）：Further development of thermal conduction engineering can be expected by applying highly developed photonics to phonon engineering due to the analogy between photons and phonons. In this research, we challenged to control thermal conduction based on the wave nature of phonon by using phononic crystal structures.

We observed that the thermal conduction can be controlled by changing the short range order of phononic crystals for the first time at 4 K. This is a milestone work in solid state physics.

研究分野：フォノンエンジニアリング

キーワード：フォノン結晶 フォノンエンジニアリング 熱伝導

1. 研究開始当初の背景

熱伝導をマクロに扱ったフーリエの法則は、伝熱工学のほとんどの場合に適用可能であるが、物理系がフォノンの平均自由行程と同程度となる場合には、微視的視点に立った現象の取り扱いが必要になる。90年代以降、半導体デバイスの微細化や熱電変換材料開発の進展を受けて、マイクロ・ナノスケールの熱伝導現象の重要性が明らかになり、古典的な粒子の拡散を記述するボルツマン方程式を用いた熱輸送解析が発展した。これら一連の研究は、熱キャリアであるフォノンを粒子として扱ったものであるが、フォノンは格子振動の量子の呼称にすぎないため、熱伝導は波動的手法（例えば周期構造による干渉）によって制御できる性質の現象のはずである。では、なぜ熱の波動性が全く意識されないのか？波動性が顕在化しない理由として、熱フォノン（フォノンのうち熱伝導に大きく寄与するフォノンと定義）の波長が構造に対して桁違いに短い、ボルツマン分布に従って熱フォノンが高周波数域に分布していること（マルチスケール性）が挙げられる。例えば Si における室温での熱フォノンの波長は数 nm であり、2 桁程度にわたり周波数分布をもつ。顕在化しないならば、今まで通り検討しなくてよいかというと、そうとも言えない時代になってきた。しかし、現在、フォノンの波動的性質を用いた量子状態・輸送制御を行い、熱伝導制御を系統的に行った実験的報告は、国内外ともに申請者の知る限り存在しない。

2. 研究の目的

フォトンとフォノンの類似性から着想したバンドエンジニアリングにより、成熟した光波制御技術を伝熱工学分野に応用し、新しい伝熱制御技術を芽吹かせることに挑戦する。伝熱工学において熱拡散は粒子描像で扱うが、格子振動の集合である熱は本来波動性を有するため、波動性に基づいた伝熱制御が可能はずである。しかし、未だに「熱は光のように扱えるのか？」という問いに対する答えは示されていない。これまでで最もフォノンの波動的性質や量子現象が顕在化する構造と環境を用意し、その問いに答える成果を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

フォノン結晶とよばれる、フォノンに対する周期構造を用いて熱伝導制御を行うことに挑戦した。これは、光波制御に用いられるフォノン結晶のフォノン版ともいえる系であり、目的である光波制御技術を伝熱工学に応用する最適の系である。本研究では、シリコン薄膜に半径 100 nm 程度の周期円孔配列を形成し、バンドエンジニアリングに基づいたフォノンの輸送制御を行うこと

で、フォノンの集団輸送である熱伝導を制御する。

試料は、厚さ 145 nm の単結晶シリコンを活性層にもつ SOI 基板を購入し、電子線描画装置、ドライエッチング装置などを用いて作製した（図 1）。熱伝導率測定には、パルスおよび連続光レーザーが用いられ、光パルスによって Al 薄膜を瞬間過熱し、フォノン結晶ナノ構造を通じて熱が散逸する。この温度変化を CW 光で反射率変化を通して測定することで、ナノ構造の熱伝導率をシミュレーションと合わせることで得ることができ

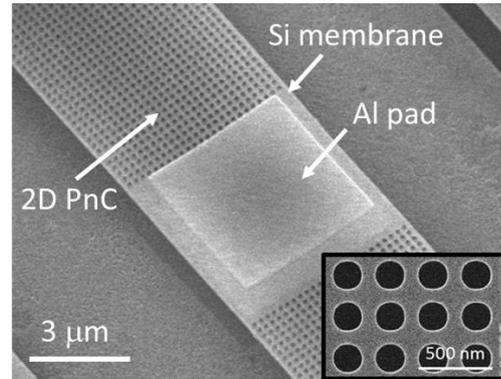


図 1. 作製したシリコンフォノン結晶ナノ構造を含むエアブリッジ構造の SEM 像。

4. 研究成果

本研究最大の目的であった、フォノンの波動性を用いた熱伝導制御を実現した。フォノン結晶ナノ構造を形成すると、薄膜に孔をあけるため、熱伝導率変化が孔の側壁のフォノン散乱によるものなのか、フォノン結晶の周期性に起因する波動性の効果なのかを切り分けることが不可能であった。そこで我々は、図 2 に示すような完全結晶構造に加えて、ランダムに円孔位置をずらしたアモルファス構造を作製し、一次元および二次元フォノン結晶において熱伝導率を測定した。ポイントは、これまでフォノン結晶を形成することによる、フォノン効果と表面散乱の切り分けが不可能であった問題を、円孔半径を完全に同一にすることによって、異なる構造での熱伝導率変化が純粋に周期性の乱れのみにも帰着できるようにした点である。この測定により、室温では、インコヒーレント散乱が主であるため、周期性の乱れに依存しない熱伝導率を観測したが、波動性が顕著になる 4 K では、完全結晶構造に近づくにつれて熱伝導が抑制される様子を観測することができた。本成果は、これまでの熱伝導制御技術が粒子的描像の範囲内を出なかった状況から、初めて波動性を用いた領域に踏み出したというマイルストーンの結果と位置づけられる。また、別途、図 2 の結果を説明する理論モデルの構築も進めている。

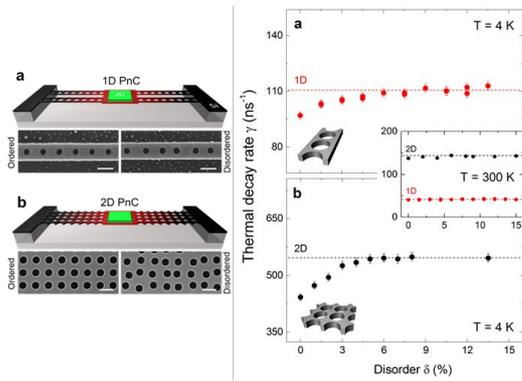


図2 (左)一次元および二次元フォニック結晶の模式図(冗談)とSEM像(下段)。(右)熱拡散時間の円孔位置ずれ量依存性。室温では孔の位置ずれに対して感度がないが、波動性が顕在化する4 Kでは、完全結晶に近いほどフォノン閉じ込めが強く、熱伝導が抑制される。

また、三角、正方、ハニカム格子についてのフォノンバンドダイアグラムを計算するプログラムを構築し、各基本格子を有するフォニック結晶構造においてバンドダイアグラムを報告した(PRB 2016)。特筆すべき点としては、フーリエ則が成立する通常の熱伝導の感覚ではとらえられない、直観に反した熱伝導が波動性によって生じることを示した点である。これは、以前熱コンダクタンスブースト効果と名付けた、「穴をあけることで熱伝導をよくする」という現象と同様である(PRB2015)。例えば、三角格子よりも体積が多いハニカム格子は、通常のセンスで考えれば熱をよく通すはずであるが、同じ円孔直径という条件の下では、より熱を通しにくいという結果になる。

これまでに、フォニック結晶における基本格子のバンドの系統的な研究がなされていなかったことから、本分野に基本的な情報を提供する研究となった。熱フォニクスの領域では、拡散伝導領域と逆の振る舞いになることがある、ということを示した(PRB 2015)。

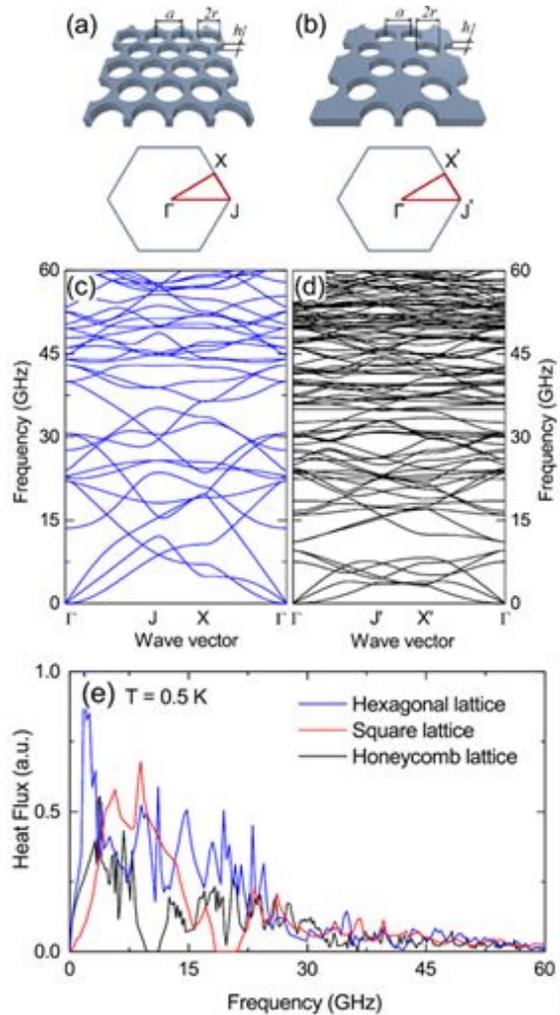


図3 三角格子とハニカム格子のフォノンバンドダイアグラムと、それらに加えて正方格子について計算した熱流束スペクトル。ハニカム格子の方が三角格子よりも体積が多いにもかかわらず熱を通しにくいことがわかる。

また、これまでの研究では、薄膜に円孔を形成することによりフォニック結晶ナノ構造を作製していたが、本研究では、薄膜に円柱を周期的に配列するピラー型のフォニック結晶にも研究領域を拡張した。系の振動モードは、薄膜上部のピラーも含めたものになるため、そのいくつかはピラーに局在するものと、薄膜を伝搬するモード、および錬成するモードに大別される。図4は、厚さ80 nmのシリコン薄膜に周期160 nmで、直径128 nm、高さ80 nmのAlピラーを三角格子状に配列したフォニック結晶の分散関係を示す。はその周波数におけるモードの平均高さを示したもので、薄膜最下部を0、ピラー最上部を1としている。すなわち、色が黒色に近いほどピラー中に局在したモードであり、薄いほど薄膜中にエネルギーを有するモードであることを示す。色が濃いモードほど、群速度が低く、強く構造中に局在するモードであることがわかる。破線は、ピラーなしのシリコン薄膜のみの構造についての分散関係

であり、色が薄いモードは破線に近い分散を示すことがわかる。

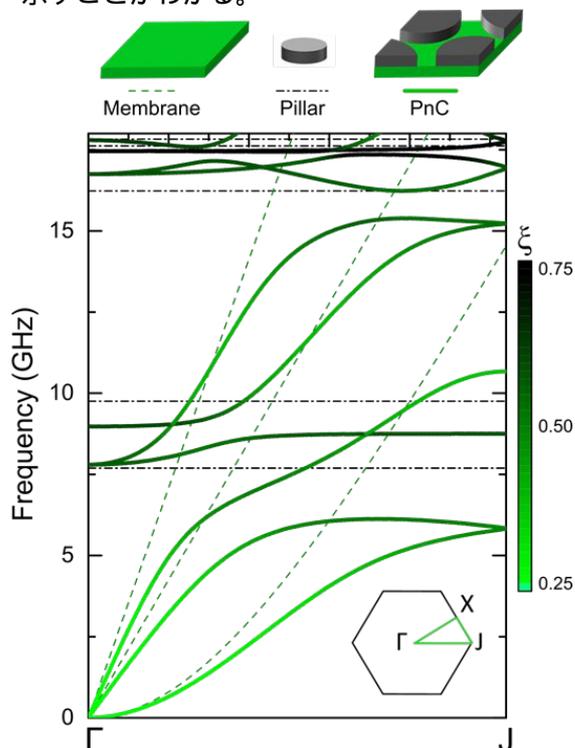


図4．新たに研究を行ったピラー型フォニック結晶。厚さ 80 nm のシリコン薄膜に周期 160 nm で、直径 128 nm、高さ 80 nm の Al ピラーを三角格子状に配列したフォニック結晶の分散関係。

図5は、厚さ 80 nm のシリコンとその上に AIP およびダイヤモンドピラーを 160 nm 周期で三角格子状に配列したピラー型フォニック結晶について状態密度と熱コンダクタンス(0.5 K)を比較した図である。直観的には、局所共鳴(LR)が多いほど熱コンダクタンスが低いと考えられるが、逆の結果が出ている。すなわち、ピラーに AIP を用いた場合、群速度が低くなる LR の数はダイヤモンドよりもはるかに多いが、状態密度が高いため、その積となり得られる熱コンダクタンスは逆転し、AIP が局在共鳴の数は多いにもかかわらず熱をよく通すことが分かった。この結果は、これまでにあった、局所共鳴が多いほど熱コンダクタンスが低いという認識を改めさせる新しい結果である。

以上のように、フォノンの波動性を利用した伝熱制御および様々なフォニック結晶についての伝熱特性を実験的およびシミュレーションによって明らかにすることができた。特に、熱の波動性を積極的に利用した伝熱制御に成功した成果は極めてインパクトが大きい。

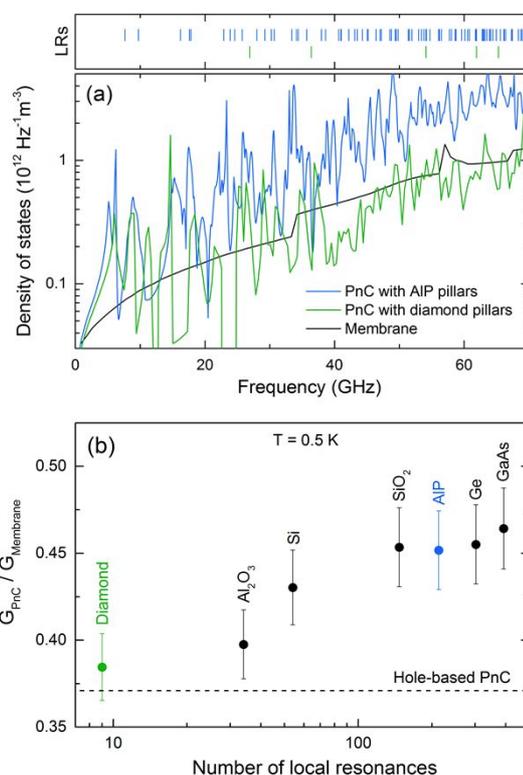


図5．シリコン薄膜とピラー型フォニック結晶について比較した状態密度と熱コンダクタンスの比。

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12件)

R. Yanagisawa, J. Maire, A. Ramiere, R. Anufriev, and M. Nomura, "Impact of limiting dimension on thermal conductivity of one-dimensional silicon phononic crystals," *Appl. Phys. Lett.* **110**, 133108 (2017).

J. Maire, R. Anufriev, and M. Nomura, "Ballistic thermal transport in silicon nanowires," *Scientific Reports* **7**, 41794 (2017).

R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, "Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures," *Nat. Commun.* in press.

M. Nomura, J. Nakagawa, K. Sawano, J. Maire, and S. Volz, "Thermal conduction in Si and SiGe phononic crystals explained by phonon mean free path spectrum," *Appl. Phys. Lett.* **109**, 173104 (2016).

M. Nomura, "Heat Conduction Control by Phononic Crystals," *Chemical Engineering of Japan*, **80**, 560 (2016).

M. Nomura, "Near-field radiative heat transfer: The heat through the gap," *Nature Nanotechnology* 11, 496 (2016).
M. Nomura, "Control of Phonon Transport by Phononic Crystals and Application to Thermoelectric Materials," *Materials Transactions* 57, 555 (2016).
野村政宏, "フォトニクスからフォノニクスへ～熱フォノニクスによる熱伝導制御～," *日本機械学会誌* 77, 7-12 (2015).
R. Anufriev and M. Nomura, "Reduction of thermal conductance in two-dimensional phononic crystals by coherent phonon scattering," *Phys. Rev. B* 93 045410 (2016).
R. Anufriev, J. Maire and M. Nomura, "Reduction of thermal conductivity by surface scattering of phonons in periodic silicon nanostructures," *Phys. Rev. B*, 93 045411 (2016).
J. Nakagawa, Y. Kage, T. Hori, J. Shiomi, and M. Nomura, "Crystal structure dependent thermal conductivity in two-dimensional phononic crystal nanostructures," *Appl. Phys. Lett.* 107, 023104 (2015).
R. Anufriev and M. Nomura, "Thermal conductance boost in phononic crystal nanostructures," *Phys. Rev. B*. 91, 245417 (2015).

[学会発表](計50件)

国際学会のみ20件まで記載する。

J. Maire, R. Anufriev, R. Yanagisawa, A. Ramiere, S. Volz, and M. Nomura, "Heat Conduction Tuning Based on the Wave Nature of Phonons," 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, NM2.4.02, Phoenix, USA, April (2017).
J. Maire, R. Anufriev, and M. Nomura, "Ballistic Phonon Transport in Si Nanowires," 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, NM2.4.03, Phoenix, USA, April (2017).
R. Anufriev, and M. Nomura, "Coherent Control of Thermal Conductance in Hole- and Pillar-Based Phononic Crystals," 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, NM2.4.23, Phoenix, USA, April (2017).
M. Nomura, J. Nakagawa, K. Sawano, J. Maire, R. Anufriev, S. Volz, "Thermal Phonon MFP Spectrum Probing Using Phononic Crystals," 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, NM2.4.24, Phoenix, USA, April (2017).
R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M.

Nomura, "Heat Focusing by Phononic Nanostructures," 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, NM2.6.02, Phoenix, USA, April (2017).

M. Nomura (Invited), "Phononic Crystal Nanopatterning in Si and SiGe Thin Films for Thermoelectric Application," TMS 2017, 27-21-1540, San Diego, USA, Feb. (2017).

R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, "Engineering directional heat flow using ballistic phonon transport in phononic nanostructures," International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016, SaP-19, Tokyo, Japan, Dec. (2016).

A. Ramiere and M. Nomura, "Spectral phonon mean free path and thermal conductivity in 1D phononic crystals," International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016, SuP2-A-13, Tokyo, Japan, Dec. (2016).
P. Zimmermann, R. Yanagisawa, and M. Nomura, "Improved thermoelectric harvester design by using nano-structuring," International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016, SuP-19, Tokyo, Japan, Dec. (2016).

M. Nomura (Invited), J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, and R. Yanagisawa, "Phonon engineering by phononic crystal nanostructures," The 28th Symposium on Phase Change Oriented Science, 9, Atami, Japan, Nov. (2016).

M. Nomura, R. Anufriev, and K. Sawano (Invited), "Thermal Phonon Transport in SiGe Phononic Crystal Nanostructures," 13th International Conference on Flow Dynamics, OS10-6, Sendai, Japan, Oct. (2016).

R. Anufriev, A. Ramiere, and M. Nomura, "Directional heat flow engineering by phononic nanostructures," Eurotherm 108 Nanoscale and Microscale Heat Transfer V, SP-CT-08, Santorini, Greece (2016).

A. Ramiere and M. Nomura, "Mean free path analysis in phononic crystals," Eurotherm 108 Nanoscale and Microscale Heat Transfer V, s05-05, Santorini, Greece (2016).

M. Nomura, R. Yanagisawa, J. Maire, R. Anufriev, and S. Volz, "Coherent thermal conduction tuning by phononic crystals," Eurotherm 108 Nanoscale and Microscale Heat Transfer V, S05-01, Santorini, Greece (2016).

M. Nomura (Invited), "Thermal

conduction control using phononic crystal nanostructures,” 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors, Mo-F3.1, Beijing, China, June (2016).

R. Anufriev, J. Maire, and M. Nomura, “Reduction of thermal conductivity in periodic silicon nanostructures,” Compound Semiconductor Week (CSW) 2016, MoP-ISCS-066, Toyama, Japan, June (2016).

J. Nakagawa, J. Maire, K. Sawano, and M. Nomura, “Nanoscale heat transport in single-crystalline Si and amorphous SiGe phononic crystals,” Compound Semiconductor Week (CSW) 2016, TuC1-2, Toyama, Japan, June (2016).

M. Nomura (Invited), “Thermal phonon engineering for thermoelectric materials,” EMN Spring Meeting 2016, Taiwan, Mar (2016).

M. Nomura, J. Nakagawa, J. Maire, and A. Roman, “Crystal structure dependent thermal conductivity in 2D phononic crystals,” 1st Pacific Rim Thermal Engineering Conference, 14-c-3-1, Hawaii, USA Mar (2016).

J. Maire, O. Paul and M. Nomura (Invited), “Silicon phononic crystals for thermoelectric applications,” EMN Meeting on Thermoelectric Materials 2016, A29, Orlando, USA, Feb (2016). M. Nomura (Invited), “Heat Transfer in Phononic Crystal Nanostructures and Thermoelectric Applications,” 12th International Conference on Flow Dynamics, OS10-3, Sendai, Japan, Nov. (2015).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.nlab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 政宏 (NOMURA, Masahiro)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：10466857

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()