

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00744

研究課題名(和文)電子やマグノンを含めた複合的フォノンエンジニアリング

研究課題名(英文)Complex phonon engineering including electronics and magnons

研究代表者

塩見 淳一郎 (SHIOMI, Junichiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：40451786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：フォノンと電子/マグノンの複合輸送系に関して、マルチスケール・モンテカルロ法シミュレータなどの解析技術や、ゼーベックスペクトル計測系などの計測技術を開発した。これらにより、電子とフォノンの非平衡性の熱輸送への影響について理解を深めた。例えば、半導体デバイス系や金属・絶縁体(半導体)界面系などを対象に、強い非平衡状態下での熱輸送特性を定量化した。また、金属/絶縁体超格子構造の計測を行い、金属・絶縁体界面近傍における熱抵抗および、その金属種や幾何学への依存性を実験的に評価し、電子・フォノン相互作用が強い系において熱伝導率が有意に低減され、それが非平衡性によって生じていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、フォノンと電子/マグノンの複合輸送系に関して、準粒子間の相互作用を考慮しながら混合輸送問題の解析を行う技術を開発した。これらの技術開発はナノスケール熱工学における重要な学術的な課題であり、開発された技術は、今後、混合輸送現象の学術の進展および、電子デバイスや熱電材料開発などの応用分野の発展に貢献することが見込まれる。また、本研究で見出された電子・フォノン相互作用が小さい金属と絶縁体や半導体の界面近傍において強い非平衡性から熱伝導率が大きく低減される有意な効果は、時・空間スケールの異なる複数種類の準粒子が共存して相互作用する「強」非平衡力学に新たな理解と制御性を付与するものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed analytical techniques such as a multiscale Monte Carlo simulator and measurement techniques such as a Seebeck spectrum measurement system for the combined phonon and electron/magnon transport systems. Through these techniques, we have deepened our understanding of the effects of the non-equilibrium nature of electrons and phonons on heat transport. For example, we quantified heat transport properties under strong non-equilibrium conditions in semiconductor device systems and metal-insulator (semiconductor) interface systems. We have also measured metal/insulator superlattice structures and experimentally evaluated the thermal resistance near the metal/insulator interface and its dependence on metal species and geometry, and found that the thermal conductivity is significantly reduced in systems with strong electron-phonon interactions by the non-equilibrium.

研究分野：分子熱工学

キーワード：フォノン フォノンエンジニアリング 電子 マグノン マルチスケール

## 1. 研究開始当初の背景

近年のフォノン輸送の科学の進展は目覚ましい。最近の10年間で、単結晶のフォノン輸送の第一原理計算が可能となり、それをもとにしたマルチスケールシミュレーションにより、複雑なナノ構造の正確な熱伝導計算が可能となった。また、ポンプ・プローブ法などの光学的測定やマイクロデバイスを使った電氣的測定により、ナノスケールの時間・長さスケールでの熱伝導計測が可能となった。これらにより、ナノスケールでは熱伝導率は現象論的なモデルであるフーリエ則には従わず、光のように、周波数、波長、偏向によって熱伝導能が異なることが明らかとなり、その特性を利用した様々な構造や材料が実現されている。当該分野は「フォノンエンジニアリング」として国内外で注目を集めている。

一方で、フォノンの輸送が重要になる材料やデバイスでは、フォノン単独の物性よりも電子（正孔）やマグノン（スピン波）などの他の準粒子と融合した物性が問題になることが多い。つまり、本来の「フォノンエンジニアリング」の範囲は、格子熱伝導の制御に留まらず、熱エネルギー変換はもとより、ジュール熱やその散逸などの制御にも及び、非常に広域である。これは、電子やマグノンのデバイスや素子の性能、消費エネルギー、熱マネジメントなどに直結し、社会的および産業的にインパクトの高い課題である。例えば、デバイスや素子内のナノ・界面構造を通じてフォノン散乱と散逸が一体的に予測・制御できるようになれば、パワー半導体デバイスの温度の低下・均一化による集積性・動作信頼性の向上、マグノン回路などの超低電力素子の性能や汎用性の向上、熱電素子（ゼーベック型やスピンゼーベック型）の電子/マグノンとフォノンのディカップリングを通じた変換性能向上が見込める。

それにも関わらず、他の準粒子との相互作用を含めた学術的な研究が少ないのは、その複合的な物性を微視的な視点から解析する技術が足りないからであると考えられる。その理由は、フォノンと他の準粒子の緩和の時空間スケールが大きく異なることと、フォノンと他準粒子の相互作用がそれぞれのモード（エネルギー、運動量、偏向）に依存することにある。例として、半導体デバイスにおいて、ジュール熱によってホットスポットが発生し、それが半導体チャンネル内（数 nm～数十 nm）を通して周囲に散逸する様を考える。この際、電子はモード選択的にフォノンにエネルギーを与えるが、緩和の遅いフォノンは強い局所非平衡状態にあり、フォノンの非平衡分布と界面の透過関数が熱散逸を決定する。ここで、チャンネルの代表長さが数十 nm の場合は、相対的に平均自由行程が小さい電子は局所平衡状態にあると見なせるが、チャンネルの代表長さが数 nm の場合は電子も局所非平衡状態になる。いずれの場合も熱の発生および散逸を評価するには、フォノンと電子の輸送を両方解く必要があるが、前者ではそれらのスケールミスマッチが問題になり、後者では、非平衡分布同士の相互作用が複雑になる。

以上を踏まえて、ナノスケール熱工学における重要な学術的な課題として、フォノンと他の準粒子の相互作用を考慮しながら混合輸送問題の解析を実現することを挙げる。課題の解決のためには、新しい計算技術および測定技術の開発が必需である。また、この課題をより基礎的な視点から見ると「時・空間スケールの異なる複数種類の準粒子が共存して相互作用する「強」非平衡力学を理解する」ことになり、物性科学における汎用的な問いにも答えることになる。

## 2. 研究の目的

以上を背景に、本研究では、フォノンと他の準粒子の混合輸送問題を高精度に取り扱える計算法および、多準粒子からフォノンへのエネルギー緩和を計測できる計測手法を開発し、それらを電子デバイスや熱電変換材料などに適用することを目的とする。これによって、時・空間スケールの異なるフォノンと他の準粒子が共存して相互作用する「強」非平衡の混合輸送の学理を深化させる。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 電子/マグノンの複合輸送系のマルチスケールシミュレーション

フォノン、電子/マグノンの複合輸送系のマルチスケールシミュレーション技術を開発した。まず、モンテカルロ法によってボルツマン輸送方程式を解いた。ボルツマン輸送方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial f_k}{\partial t} + V_e \cdot \nabla_r f_k - \frac{eE}{\hbar} \cdot \nabla_k f_k = \Omega_{e-ph} \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_{v,p}}{\partial t} + V_{ph} \cdot \nabla_r n_{v,p} = \Omega_{ph-e} + \Omega_{ph-ph} \quad (2)$$

ここで  $f_k$  は電子の分布関数、 $n_{v,p}$  はモード  $v$ 、波動ベクトル  $p$  のフォノンの占有数であり、 $V_e$  と  $V_{ph}$  は電子とフォノンの群速度である。 $\Omega_{e-ph}$ 、 $\Omega_{ph-e}$ 、および  $\Omega_{ph-ph}$  は電子・フォノン、フォノン・電子、フォノン・フォノン散乱頻度であり、異なる電子とフォノンの間のエネルギー交換、および異なるフォノンモードの間の結合を決定するものである。この結合方程式を解く上

での一つの課題は、異なるモードにわたって積分する必要がある複雑な散乱項にある。この問題を単純化するために、緩和時間近似を用いた。緩和時間は、第一原理計算から求めることができる。一方、エネルギー保存式から、電子とフォノンのエネルギー交換は次のように書くことができる。

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{ep} = -G_{ep}(T_e - T_p). \quad (3)$$

左辺の項は、電子-フォノン散乱による電子系のエネルギー交換速度を表している。 $G_{ep}$ は電子・フォノン結合定数であり、 $T_e$ と $T_p$ は平衡状態での電子とフォノンの温度である。これから、いくつかの線形代数に基づいて、電子フォノン結合強度をモード分解フォノン緩和時間で書くこととなる。

$$G_{ep} = \sum_q \frac{C_p}{\tau_{ep}(\omega_q)} \quad (4)$$

ここで  $C_p$  はフォノンモードの熱容量であり  $\tau_{ep}(\omega_q)$  は緩和時間である。本研究では以上をモンテカルロ法により解いた。

### 3. 2 複合的フォノンエンジニアリングの評価手法

電子・フォノンおよびマグノン・フォノンの結合現象の新しいポンプ・プローブ計測の実施・実証のとして、ゼーベック係数のポンプ・プローブ計測を試みた。本手法では、半導体試料表面にマイクロ加工で試料に電極を作りこみ、ポンプレーザで周期的に加熱しながら、電圧出力を電氣的にプローブする。そのためには、理論モデルの導出と実験系の構築が必要となる。まず、ボルツマン輸送方程式を周波数領域で解き、ゼーベック係数の周波数への依存性を予測するモデルを導出した。理論モデリングでは、周波数領域における純粋な熱電輸送の拡散方程式（フーリエの法則、オームの法則、ケルビン関係、電荷・エネルギー保存則など）をベンチマークとして解いた。さらに、ボルツマン輸送方程式を 2 フラックス法で解き、ゼーベック係数の加熱周波数依存性を予測するモデルを導いた。ここで、フォノンと電子のボルツマン輸送方程式がゼーベック係数のフォノンドラッグ項を与え、マグノンと電子のボルツマン輸送方程式がマグノンドラッグ項を与える。

次に周波数領域サーモフレクタンス法に基づくゼーベック係数測定系を開発し、理論予測の実験的実証を行った。ゼーベック電圧を測定するための金属センサーを設計し、標準的なリソグラフィ製プロセスに従って作製した。試料の熱特性を決定するための標準的な周波数領域サーモフレクタンス法の測定を行った上で、対物レンズから放射されるレーザーの強度と金属トランスデューサーの表面反射率を測定することによりレーザービームの加熱パワーを推定し、最後にレーザー加熱により誘起されるゼーベック電圧の測定を行った。

また、時間分解光磁気カー効果法の計測系も構築した。基本的な原理としては、ポンプ光（フェムト秒パルスレーザ）によって試料を励起し、それへの応答を計測するが、これまで行ってきた表面に堆積した（金属）測温層の反射率の温度依存性（サーモフレクタンス）に加えて、光磁気カー効果の回転角の温度依存性を利用して温度を計測する。これにより従来型の時間領域サーモフレクタンス法で使用する非磁性トランスデューサ膜に比べ、熱伝導率の低く、薄い磁性トランスデューサ膜を使用することができ、下地材料の面内熱伝導率の測定などの測定感度が向上する。

### 3. 3 金属/絶縁体超格子のフォノン・電子非平衡熱輸送

図 1 に示すように、シリコン板上に超格子試料を成膜し、上部に Al 薄膜を堆積した。超格子部は金属と絶縁体から成るが、金属層には、電子・フォノン相互作用が強い d 電子系金属であるタンタル (Ta) か、相互作用が弱い s 電子系金属である金 (Au) 系を用いた。数 nm ~ 数十 nm の金属・絶縁体層を交互に積層し、全体の膜厚は 100 nm オーダーである。金属層と絶縁体層の厚さ関係から Type I と Type II に分類し、Type I では金属層及び絶縁体層の厚さを同じにし、Type II では金属層と絶縁体層を合わせた 1 ユニットの厚さを 20 nm に固定した。熱伝導率は時間領域サーモフレクタンス法を用いて計測した。

得られた熱伝導率の低減効果のメカニズムを理解するべく、拡散方程式に基づく二温度モデルを用いて金属・絶縁体超格子構造の実効的な熱伝導率を理論的に計算した。実効熱伝導率の計算は金属層の電子及びフォノン熱伝導率、電子・フォノン相互作用の強さ、絶縁体層の熱伝導率、金属・絶縁体層間のフォノン輸送による界面熱抵抗を入力とする。

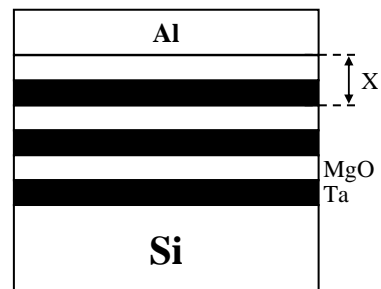


図 1 超格子試料模式図

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 電子/マグノンの複合輸送系のマルチスケールシミュレーション

フォノン、電子/マグノンの複合輸送系のマルチスケールシミュレーション技術を開発した。電子、フォノン、およびマグノンの時空間スケールのミスマッチについては、準粒子のエネルギーごとにシミュレーションの時間ステップを変えるプラクティカルな手法も導入した。まず、緩和時間近似のもとでモンテカルロ法によってボルツマン輸送方程式を直接解く手法を実践した。

典型的な電子・フォノン相互作用の第一原理計算の結果を、ゲルマニウム結晶を例にとって図 2 に示す。フォノン分散と状態密度、Eliashberg スペクトル関数とその第 2 運動量、および温度依存の電子フォノン結合強度を示したものである。ゲルマニウムのフォノン状態密度は 10meV と 35meV のエネルギーでピークを持ち、Eliashberg スペクトル関数から、電子は 35meV の周波数でフォノンモードと最も強く結合していることがわかる。フォノンの分散から、これらの強結合モードは音響分岐のゾーン端に位置していることがわかる。

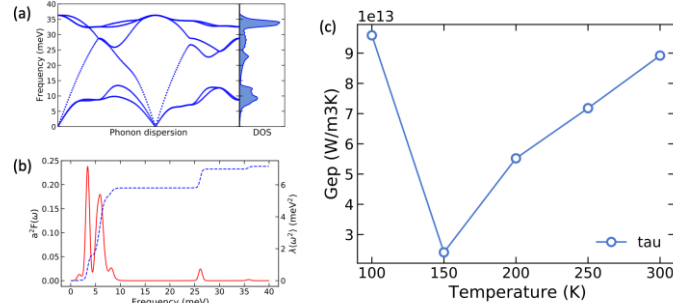


図 2 (a) フォノン分散と状態密度、(b) Eliashberg スペクトル関数とその第 2 運動量、(c) ドープした Ge の温度依存電子フォノンカップリング。

図 1(c)は、電子・フォノン結合強度の温度依存性を示している。温度が 100 K から 150 K まで上昇すると結合強度は急激に減少するが、さらに温度を上昇させると電子フォノン結合強度に正の影響を与えることがわかった。

また、同様の手順でフォノン・マグノンの結合を調べた。図 3 に時間依存のスピンの格子温度の変化を示す。一般に、スピンと格子は 1 ps 程度のタイムスケールで平衡温度に到達する。軌道と原子位置、スピン角から、式から特定モードのスペクトルエネルギー密度を抽出することができる。図 3(b)に異なる周波数でのマグノンスペクトルエネルギーを、図 3(c)にマグノンの分散関係を示す。マグノンの緩和時間は周波数の上昇とともに減少する。

異なる準粒子間の相互作用を考慮した様々な輸送問題を、モンテカルロシミュレーションを用いて行った。例えば、電子デバイスにおける非平衡高エネルギー電子（ホットエレクトロン）生成および散逸のプロセスを理解するために、短チャネル GaAs ダイオードにおける電子およびフォノン輸送のシミュレーションを行った。その結果、準粒子間の強い結合により、ホットエレクトロンの過剰エネルギーのほとんどが偏向光学フォノンの散乱プロセスを介して散逸する様子が見て取れた。ドレイン端での局所的なヒートスポットの温度は、フーリエの法則の予測より 50% 高くなった。また、金属/絶縁体界面での電子・フォノン非平衡およびその熱輸送への影響について、Au と Si の界面の構造とその超格子構造についても解析を行った。その結果、電子・フォノン相互作用の特性長は 30 nm 程度であることがわかった。

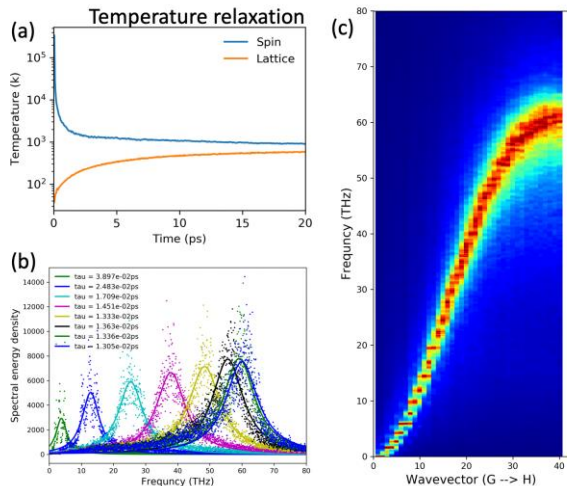


図 3(a) Fe の格子温度とスピン温度の時間変化、(b) 異なるエネルギーでのマグノンのスペクトルエネルギー密度、(c) マグノンの分散関係。

##### 4. 2 複合的フォノンエンジニアリングの評価手法

ゼーベック係数の周波数依存性を予測するモデルを、ボルツマン方程式と 2 フラックス法によって導出した。ドラッグ項は超高速加熱領域での非拡散的フォノン輸送と密接に関係しているため、強い周波数依存性を示す。ケーススタディとして、このモデルを n 型 Si に適用したところ、比較的低温（約 200 K 以下）の軽ドープ Si の場合、ゼーベック係数の著しい周波数依存性が予測され、温度とドーパント濃度の増加により、この依存性が低減することが分かった。

さらに、周波数領域サーモリフレクタンス法装置を用いたゼーベック係数測定スキームを開発した。測定されたゼーベック電圧信号から見かけのゼーベック係数を導出するモデルを、周波数領域における拡散方程式から導出した。さらに、センサーの設計と製作を行った。低周波領域でのデータによると、Si 試料の基準ゼーベック係数は、ZEM-3 システムで従来の定常法で得られたものより低くなった。この乖離は、レーザー加熱パワーの推定に起因していると考えられるため、ゼーベック係数の加熱周波数依存性を評価する前に、実験装置の校正が必要であり、これを行う新しい校正プロセスを構築した。

#### 4. 3 金属/絶縁体超格子のフォノン・電子非平衡熱輸送

タンタル(Ta)/酸化マグネシウム(MgO)と、金シリコン(AuSi)/酸化マグネシウム(MgO)の Type II 超格子の熱伝導率の計測結果を図 4 と図 5 にそれぞれ示す。図では金属層の膜厚への依存性としてプロットしており、二温度モデルによる計算値と比較している。Au は Ta よりも電子・フォノン相互作用が弱いことで、電子とフォノンの非平衡性が強いことが想定される。また、非平衡性が強い場合は、金属であっても電子に熱が行き渡らずにフォノンが熱を運ぶため、フォノン熱伝導率を下げるべく Si を混入することで結晶化を抑制した。図中の計算値の No EPC, あるいは Infinite EP はそれぞれ、電子・フォノン相互作用 (EPC) の強さが非常に小さい、あるいは無限に大きいと仮定した場合の実効熱伝導率の計算値である。まず、計算値と実験値の傾向は良く一致していることが見て取れる。定量的には、EPC が強い金属系(Ta/MgO)超格子の熱伝導率の計測値は EPC が無限に大きいと仮定した実効熱伝導率に近く、EPC が弱い金属系(AuSi/MgO)超格子の熱伝導率の計測値は EPC を小さいと仮定した予測結果に近い。

実効熱伝導率と計測熱伝導率から計算した AuSi/MgO 超格子全体の熱抵抗及び各抵抗要素の寄与を図 6 に示す。図から AuSi 層内の電子・フォノン間のエネルギー交換による熱抵抗は界面熱抵抗と同等の寄与を有することがわかる。また、金属層の単位厚さ当たりの EPC による熱抵抗が金属層の厚さに依存して変化することが分かる。これは電子・フォノン間の非平衡性が金属層の厚さに依存することを意味し、金属層のスケールによって金属内の支配的な熱伝導メカニズムが変化することを示唆する。つまり、電子・フォノンの非平衡性が強い場合、非平衡性の緩和長内であれば、膜厚を大きくしても熱輸送に電子が寄与せずフォノンのみが輸送することは変わらないため、金属の膜厚を大きくすればするほど熱抵抗が大きくなる。

以上によって、電子・フォノン相互作用が弱い系において熱伝導率が有意に低減され、それが非平衡性によって生じていることが明らかになった。この知見はナノスケールでの新たな断熱機構として有用である。

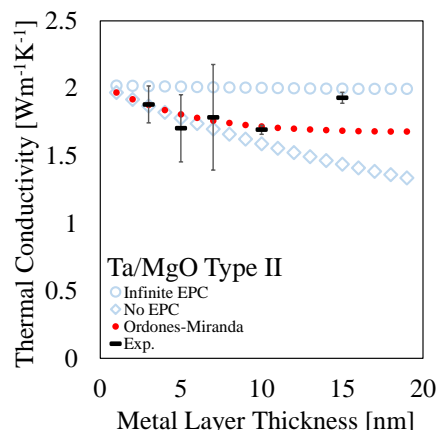


図 4 Ta/MgO 超格子構造の熱伝導率の Ta 膜厚への依存性

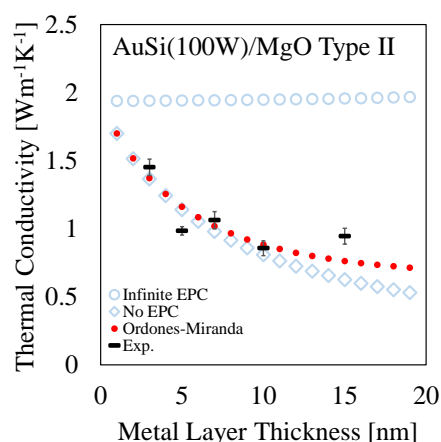


図 5 AuSi/MgO 超格子構造の AuSi 膜厚への依存性

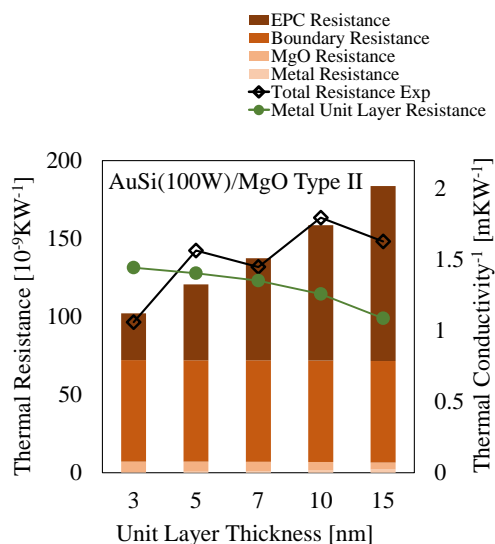


図 6 AuSi/MgO の熱抵抗の内訳および熱伝導率の単位層厚さへの依存性



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hu Shiqian, Feng Lei, Shao Cheng, Strelnikov Ivan A., Kosevich Yuriy A., Shiomi Junichiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Two-path phonon interference resonance induces a stop band in a silicon crystal matrix with a multilayer array of embedded nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 24301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.024301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ju Shenghong, Miura Yoshio, Yamamoto Kaoru, Masuda Keisuke, Uchida Ken-ichi, Shiomi Junichiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Machine learning analysis of tunnel magnetoresistance of magnetic tunnel junctions with disordered MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.023187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hu Run, Iwamoto Sotaro, Feng Lei, Ju Shenghong, Hu Shiqian, Ohnishi Masato, Nagai Naomi, Hirakawa Kazuhiko, Shiomi Junichiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Machine-Learning-Optimized Aperiodic Superlattice Minimizes Coherent Phonon Heat Conduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 21050
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevX.10.021050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tambo Naoki, Liao Yuxuan, Zhou Chun, Ashley Elizabeth Michiko, Takahashi Kouhei, Nealey Paul F., Naito Yasuyuki, Shiomi Junichiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Ultimate suppression of thermal transport in amorphous silicon nitride by phononic nanostructure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabc0075
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abc0075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ju Shenghong, Shimizu Shuntaro, Shiomi Junichiro	4. 巻 128
2. 論文標題 Designing thermal functional materials by coupling thermal transport calculations and machine learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 161102 ~ 161102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0017042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hu S., Ju S., Shao C., Guo J., Xu B., Ohnishi M., Shiomi J.	4. 巻 16
2. 論文標題 Ultimate impedance of coherent heat conduction in van der Waals graphene-MoS2 heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Today Physics	6. 最初と最後の頁 100324 ~ 100324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtphys.2020.100324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shao Cheng, Matsuda Kensuke, Ju Shenghong, Ikoma Yoshifumi, Kohno Masamichi, Shiomi Junichiro	4. 巻 129
2. 論文標題 Phonon transport in multiphase nanostructured silicon fabricated by high-pressure torsion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 085101 ~ 085101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xu Bin, Hung Shih-Wei, Hu Shiqian, Shao Cheng, Guo Rulei, Choi Junho, Kodama Takashi, Chen Fu-Rong, Shiomi Junichiro	4. 巻 175
2. 論文標題 Scalable monolayer-functionalized nanointerface for thermal conductivity enhancement in copper/diamond composite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 299 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.01.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamaguchi Shingi, Shiga Takuma, Ishioka Shun, Saito Tsuguyuki, Kodama Takashi, Shiomi Junichiro	4. 巻 92
2. 論文標題 Anisotropic thermal conductivity measurement of organic thin film with bidirectional 3 method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 034902 ~ 034902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0030982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakayama Hiroyasu, Xu Bin, Iwamoto Sotaro, Yamamoto Kaoru, Iguchi Ryo, Miura Asuka, Hirai Takamasa, Miura Yoshio, Sakuraba Yuya, Shiomi Junichiro, Uchida Ken-ichi	4. 巻 118
2. 論文標題 Above-room-temperature giant thermal conductivity switching in spintronic multilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 042409 ~ 042409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0032531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hung Shih-Wei, Hu Shiqian, Shiomi Junichiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Spectral Control of Thermal Boundary Conductance between Copper and Carbon Crystals by Self-Assembled Monolayers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2594 ~ 2601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.9b00587	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Xiaoxiang, Li Ruiyang, Shiga Takuma, Feng Lei, An Meng, Zhang Lifa, Shiomi Junichiro, Yang Nuo	4. 巻 123
2. 論文標題 Hybrid Thermal Transport Characteristics of Doped Organic Semiconductor Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Tosylate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 26735 ~ 26741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b09105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する



1. 著者名 Ota Aun, Ohnishi Masato, Oshima Hisayoshi, Shiga Takuma, Kodama Takashi, Shiomi Junichiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Enhancing Thermal Boundary Conductance of Graphite?Metal Interface by Triazine-Based Molecular Bonding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 37295 ~ 37301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b11951	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Shingi, Tsunekawa Issei, Komatsu Natsumi, Gao Weilu, Shiga Takuma, Kodama Takashi, Kono Junichiro, Shiomi Junichiro	4. 巻 115
2. 論文標題 One-directional thermal transport in densely aligned single-wall carbon nanotube films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 223104 ~ 223104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miura Asuka, Sepehri-Amin Hossein, Masuda Keisuke, Tsuchiura Hiroki, Miura Yoshio, Iguchi Ryo, Sakuraba Yuya, Shiomi Junichiro, Hono Kazuhiro, Uchida Ken-ichi	4. 巻 115
2. 論文標題 Observation of anomalous Ettingshausen effect and large transverse thermoelectric conductivity in permanent magnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 222403 ~ 222403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5131001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 野村 政宏、塩見 淳一郎、志賀 拓磨、Roman Anufriev
2. 発表標題 Thermal phonon engineering by tailored nanostructures
3. 学会等名 第81回応用物理学会 秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junichiro Shiomi
2. 発表標題 Materials Informatics for Thermal Transport Realized by The Research Hub
3. 学会等名 NSF-JST Joint Workshop Thermal Transport, Materials Informatics and Quantum Computing
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junichiro Shiomi
2. 発表標題 Designability of nanostructures impeding phonon transport
3. 学会等名 10th International Conference on. Materials for Advanced Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichiro Shiomi
2. 発表標題 Designing thermal-functional nanostructures by materials informatics
3. 学会等名 The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Issei Tsunekawa, Masato Ohnishi, Lei Feng, Junichiro Shiomi
2. 発表標題 Interfacial Transport of electron and phonon in silicon-based thermoelectric materials
3. 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yuxuan Liao, Harsh Chandra, Junichiro Shiomi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Woodhead Publishing	5. 総ページ数 19
3. 書名 Thermoelectric Energy Conversion	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>熱エネルギー工学研究室  <a href="http://www.phonon.t.u-tokyo.ac.jp">http://www.phonon.t.u-tokyo.ac.jp</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大西 正人  (OHNISHI Masato)  (30782560)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任助教   (12601)	
研究分担者	内田 健一  (UCHIDA Kenichi)  (50633541)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・グループリーダー   (82108)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------