

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2015

課題番号：26709009

研究課題名(和文) 微視的なフォノン輸送特性を利用したナノ構造の熱伝導制御

研究課題名(英文) Controlling heat conduction of nanostructures using microscopic phonon transport characteristics

研究代表者

塩見 淳一郎 (Shiomi, Junichiro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40451786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：固体を媒体とした熱エネルギーの輸送、蓄熱、変換を行う上で重要な熱機能である固体材料の格子(フォノン)熱伝導の制御性を向上させるために、理論・数値解析、材料合成、物性評価を三位一体としたフォノンエンジニアリング技術を開発した。まず、フォノンモードに依存した熱伝導の評価および、界面原子構造とフォノン輸送の相関に基づいた熱伝導の制御を行い、それによって得られた技術や知見を用いて、高性能のナノ構造化シリコン熱電変換材料を開発した。また、ナノカーボンを用いた複合材の構造を制御することによって、熱伝導特性と機械的特性を両立した。さらに、フォノンの波動性を利用した熱伝導制御を念頭に数値解析技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the controllability of the lattice (phonon) heat conduction in solid states, which is an important thermal functions to transport, storage, and conversion with solid medium, we developed a phonon engineering technique that couples, theoretical/numerical analysis, material synthesis/fabrication, and physical property measurements. Firstly, we developed methods to evaluate the mode-dependent heat conduction. We then identified the controllability of heat conduction on the basis of the correlation between phonon transport and interface atomic structure. Using the techniques and knowledge obtained thereby, high-performance nanostructured silicon thermoelectric materials was developed. In addition, nanocarbon composites with thermally percolated filler network was developed to enhance both thermal and mechanical properties. Furthermore, we developed a basic analysis technique to calculate phonon transport including their wave nature.

研究分野：分子熱工学

キーワード：熱伝導 フォノン輸送 ナノ構造 界面 マルチスケール

1. 研究開始当初の背景

熱エネルギーを適切な時間と空間に移す技術は、廃熱利用、環境発電、電子や光デバイスの熱マネジメントなどにおいて重要である。システムと材料の開発が一体となったアプローチが必要となる中で、優れた熱エネルギー輸送、蓄熱、変換性能を有する材料の開発が急務である。固体中の格子熱（フォノン）伝導性能は最も重要な熱機能の1つであり、熱エネルギー輸送はもとより、蓄熱における放熱・再生速度や、熱電変換における温度勾配（キャリアの駆動力）を決定する。

一方で、熱伝導はその拡散性の強さから、他のエネルギー形態（光、電子）の伝導と比較して制御性が大幅に劣る。これは、光や電気の輸送は室温で伝導と絶縁を切り替えることができるが、熱伝導率の最大値（超高純度単結晶）と最小値（アモルファス限界）の比は、制御性の比較的高いシリコン材料であっても100程度であることからわかる。

熱工学分野では、固体の格子熱伝導の制御を目的として、新しい材料や機構の研究が盛んに行われて来た。特に近年、ナノスケール構造の合成、観察、物性評価技術を駆使して、熱伝導の制御性が向上している。例えば、熱電変換応用を見据えた研究においては、ナノワイヤー、超格子構造、薄膜などによって結晶材料の熱伝導率を大幅に低減することに成功している。一方で、これまでの研究は経験的に構造を変化させながら熱伝導率を評価したものが多く、微視的なフォノン輸送との因果関係は必ずしも明らかでない。

フォノンエンジニアリングの実践には向けては、フォノンモードに依存した熱伝導の評価法が必要である。また、それらの知見を実際の材料の理解や制御に活かすには、複雑構造の解析および計測技術の進展が欠かせない。特に、熱輸送の制御性が高い界面における、界面原子構造と熱輸送の相間を理解が重要である。

2. 研究の目的

固体を媒体とした熱エネルギーの輸送、蓄熱、変換を行う上で重要な熱機能である固体材料の格子（フォノン）熱伝導の制御性を向上させるために、数値解析構造設計、材料合成、物性評価を三位一体としたフォノンエンジニアリングを行う。それを活用して、複雑構造材料の界面原子構造を通じたフォノン輸送の制御を原理原則に立脚して実現する。さらに、微視的なフォノン輸送特性を考慮して、それらを最適に組み合わせるナノ構造を設計・合成することにより、熱伝導率域を拡大することを目指す。

3. 研究の方法

(1) フォノンモードに依存した熱伝導評価

第一原理から求めた単結晶の力定数をも

とに、分子動力学、格子動力学、モンテカルロ計算を適材適所に用いて、ナノ結晶粒界のマルチスケールのフォノン輸送を計算した。その際、フォノンの界面透過モデル、合金などの極所内部構造（非均一結晶）の影響を取り扱えるように拡張した。

モンテカルロ法に拡張する際は、単結晶計算から得られたフォノン輸送物性をもとに、フォノン気体のボルツマン輸送方程式を解くことでナノ構造化材料の計算を行った。ボルツマン方程式に入力するフォノン輸送物性に、第一原理計算から得た群速度と緩和時間を入力することによって、第一原理に基づいた計算を可能にした。フォノンはそれぞれの群速度に従って移流するとともに、ナノ結晶内部でのフォノン散乱に従って散乱する。実際の計算においては、フォノンが散乱する度に、その全ての状態（周波数、偏向、群速度、方向）を局所温度に対応する平衡分布に従ってリセットした。

また、分布関数を解くのでなく、系の片側からフォノンを1つずつ「打ち込んで」反対の面に透過する確率を計算することで熱伝導率を求める「レイトレーシング法」的な手法も開発した。この場合の熱伝導率はLandauerの公式で与えられる。フォノン・フォノン散乱（やその他の内部散乱）と界面散乱が独立な事象であると仮定すれば、計算はさらに簡便になる。まず、内部散乱を無視してレイトレーシング法を行い、得られる透過関数をもとに界面散乱過程に対する平均自由行程を計算した。次に、Matthiessen則を用いて内部散乱による平均自由行程と組み合わせ、全体の平均自由行程を求める。熱伝導率を計算した。

加えて、実験においてフォノンモードに依存した熱伝導率（熱伝導スペクトル）を測定した。計測には、フェムト秒パルスレーザーを用いて試料表面の温度をピコ秒の時間分解能で測定する時間領域サーモリフレクタンス(Time-Domain Thermoreflectance, TDTR)法を用いた。レーザー加熱・測温領域を変化させながら計測を行うことによって、熱伝導率のサイズ効果を誘起した。加熱領域がフォノン平均自由行程より小さい場合は、熱伝導率がレーザー径のサイズによって変化し、それからフォノンモードに依存した熱伝導率への寄与が見積もれる。特に、これまで計測が困難であった熱伝導率が低い材料の計測をターゲットとした。

(2) 界面原子構造とフォノン輸送の相間に基づいた熱伝導制御

界面の原子構造のフォノン輸送への影響を検証するために、2次元界面系を合成し、界面原子構造を変化させながらTDTR法によってSi-Si界面熱コンダクタンスを評価した。TDTR法では、試料表面に堆積した金属層をポンプレーザーで加熱し、温度に依存して変化する表面反射率をプローブレーザーで計

測することによって表面温度の応答を計測し、熱伝導方程式などの物理モデルをフィッティングすることによって、試料の熱物性を同定する。ただし、TDTR法で計測するためには、試料がいくつかの要件を満たす必要がある。まず、TDTR法は熱浸透深さ(～数 μm)の範囲内の物性のみ測定可能であるため、片側のSi層は薄膜である必要がある。さらに、物理モデルとの整合性を担保するために、Si薄膜層は膜厚や平行度、平坦度を高精度で制御する必要がある。

本研究ではSOI基板とSi基板を接合に利用することでこれらの要件を満たした。SOI基板は、Si薄膜/SiO₂薄膜/Si支持基板の3層構造を有し、各層の平行度および平坦度が高い。SOI基板のSi薄膜側とSi基板をプラズマ焼結によって接合した後に、SOI基板のSi支持基板とSiO₂薄膜を選択的エッチングによって除去してSi薄膜のみ残すことで所望の構造を得た。

接合方法としては焼結接合や常温接合を用い、温度や圧力などの作製条件や、接合前の表面化学処理を変えることにより、様々な界面構造を形成した。得られた試料の断面TEMなどによって界面の原子構造、ひずみ、応力を同定することで、界面熱コンダクタンスとの相関を検討した。

(3) ナノ構造化シリコン熱電変換材料の作製

本研究で得られた技術や知見を用いてSiを基盤材料とした熱電変換材料の開発を行った。具体的には、SiO_x相を含むSiナノ多結晶を作製した。プラズマCVD(PECVD)法を用いて作製した平均直径6nmのナノ粒子を放電プラズマ焼結することによってバルク材料を作製した。その際、Siナノ粒子の酸化時間を変えることによって試料内の酸素量を制御した。

(4) ナノチューブやナノファイバーを用いた熱伝導制御

熱伝導率が高い低次元材を低熱伝導率母材に添加した複合材の熱伝導率の律速要因である、「熱的パーコレーション」の不足の解消を念頭に、複合材内でのナノファイバー材の熱的パーコレーションを実現するべく、カーボンファイバーのネットワークをアルミニウムで表面コーティングした後に、その隙間に母材を充填することで、複合材を作製した。ただし、それだけでは強固なネットワーク構造が複合材の粘性を劇的に増加させてしまうために、通常のTIMのようにチップやヒートシンクに塗ることができないのが問題となる。それを解決するために、複合材を作製してからチップとヒートシンクの間に搭載するのではなく、ヒートシンクの表面に複合材を直接合成する「オンサイト合成」プ

ロセスを考案して実践した。

具体的には、アルミニウム粉末の上に、炭素繊維粉末をのせて積層させ、放電プラズマ焼結を施すことで炭素繊維/アルミニウム複合材料(とアルミ基板が結合した構造)を作製した。炭素繊維には直径10 μm のピッチ系炭素繊維、直径150nmのVapor Grown Carbon Fiber(VGCF)、および直径9.5nmの多層カーボンナノチューブの3種類を用いた。その後、シリコンオイルをコンジット層の上に滴下してTIMを形成した。

また、カーボンナノチューブ(CNT)の熱伝導率、電気伝導率、ゼーベックを非平衡グリーン関数法と分子動力学法を用いて計算し、欠陥が生じた際の影響や、ネットワーク化した際の影響など、実際の応用上避けられない状況下での熱電性能を評価した。

(5) フォノンの波動性を利用した熱輸送制御

フォノンの位相が保たれる範囲(コヒーレント長)内であれば、周期性を導入して結晶の単位胞を増大させることによって、フォノンバンド(分散関係)のギャップを開けたり分散を小さくしてフォノン波の伝播を制御することが可能となる。一方で、コヒーレント長に関する知見が殆どないことが、研究の妨げとなっている。そこで、本研究では、分子動力学法を用いてシリコン結晶材料のフォノンのコヒーレント長を同定する手法を開発した。

4. 研究成果

(1) 第一原理から求めた単結晶の力定数をもとに、分子動力学、格子動力学、モンテカルロ計算を適材適所に用いて計算するマルチスケール手法を開発した。特に、フォノンの界面透過や合金などの極所内部構造(非均一結晶)の影響を取り扱えるようにし、様々な材料に適用した。この中で、熱伝導率スペクトル(または累積熱伝導率(図1))の分布の一部(平均自由行程が小さい/大きい極限領域)が材料に依らず相似性を有することに着目して、それぞれの領域のスケーリング則を見出し、熱伝導率の普遍化を行った。

また、マルチスケール手法を用いて、シリコン(Si)ナノ多結晶の熱伝導率の粒径および界面熱コンダクタンスへの依存性を計算した(図2)。これから、平均粒径を20nm、界面熱コンダクタンスを100Wm⁻²K⁻¹にできれば、熱伝導率をアモルファスSiの値よりも小さくできることがわかった。なお、粒径分布の標準偏差0.35まで広げて計算した結果、平均粒径が同じであれば、分布の広がり熱伝導率に殆ど影響しないことも明らかとなるなど、材料の熱伝導を制御する上で有用な設計指針が得られた。

また、実験においてフォノンモードに依存した熱伝導率の測定を実現した。レーザー加熱・測温領域を数十 nm のオーダーで変化させながら計測を行うことによって、熱伝導率が低い材料であってもサイズ効果を誘起できることを示し、ナノスケールのフォノン平均自由行程までの評価を行った。

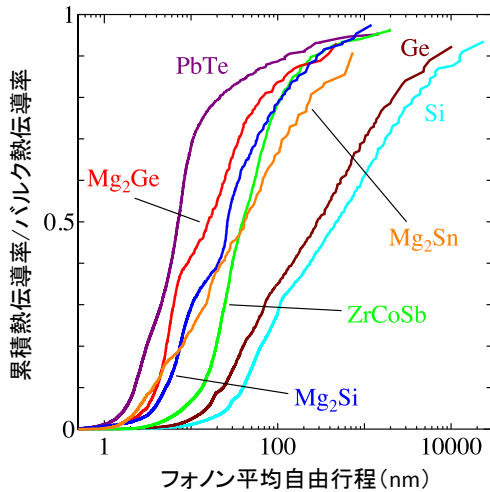


図 1 第一原理計算から得られた累積熱伝導率

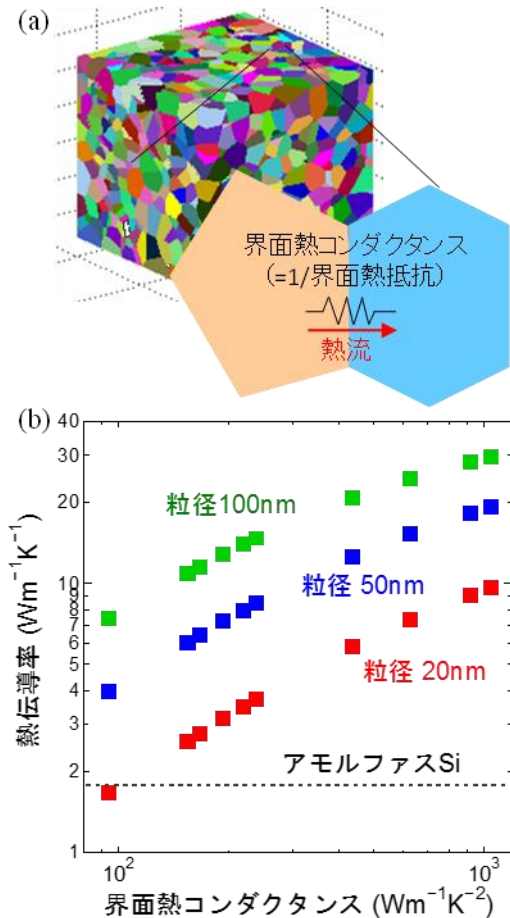


図 2 Si ナノ多結晶体の熱伝導率

(2) 焼結接合や常温接合によって作製した界面構造を計測し、断面 TEM によって界面の原子構造やひずみ分布を詳細に同定することで、界面熱コンダクタンスとの相関を明らかにした

焼結温度や圧力、焼結前の表面化学処理の方法、結晶方位などを変えながら試料を作製することで、実際の材料で起こりうる様々な界面構造を作り分けることができた。図 3 に得られた界面構造の TEM 像と計測された界面熱コンダクタンスの関係を示す。例えば、ある程度低温で焼結すると、表面に残存した自然酸化膜が拡散して界面近傍に SiO_x ナノ粒子 (x は数%) として析出することで、界面熱コンダクタンスを大きく低減することが見て取れる。ナノ粒子が存在しない箇所は結合が連続していることから、電気伝導は然程阻害されないことが期待できる。また、100 面と 111 面の結晶方位の違いにより、界面熱コンダクタンスが大きく低減されることもわかった。

これらの計測によって、Si-Si 界面の熱コンダクタンスは界面構造によってオーダー ($100\text{-}1000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) で制御できることがわかった。これと図 2 の解析結果を合わせて考えると、ナノ多結晶体の熱伝導率は、界面に SiO_x 相を析出させて (なお、結晶方位は自然に不揃いとなる)、粒径を 20 nm 程度まで低減できれば、 $10\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を切る事が予測された。

(3) 試料を作成した結果、70%のナノ多結晶相と 30%のアモルファス SiO_x 相から成る材料が得られた。アモルファス SiO_x 相はナノ多結晶相に囲まれるように点在しており、焼結中に粒子表面の酸化膜が流動的に移動・凝集して形成されたと考えられる。Si ナノ多結晶相の平均粒径は、焼結によって粒成長した結果、30 nm 程度であった。得られた材料の熱伝導率はナノ構造化と SiO_x 相の混入により先行研究の半分程度まで低減された。一方、パワーファクター (ゼーベック係数の 2 乗 \times 電気伝導率) は先行研究より若干小さい程度に収まった。これによって性能指数 ZT は最大で 850°C において $ZT = 0.58$ を示し、これまでの PECVD を用いた先行研究に比べ 25% 程度向上した。また、 600°C までの ZT はナノ構造化バルク Si 熱電材料のチャンピオンデータと同等となった。

(4) 作製したアルミ基板の表面に一体的に接合された VGCF ネットワーク (アルミにより熱的にパーコレート) のコンポジット層の熱抵抗および、シリコン基板に押し付けた際の接触熱抵抗を評価した。まず、通常アルミ基板を直接シリコン基板に押し付けた場合に比べ、表面にコンポジット層を設けることによって接触熱抵抗が大幅に低減されることがわかった。これはアルミニウムよりも機械的コンプライアンスが高いコンポジッ

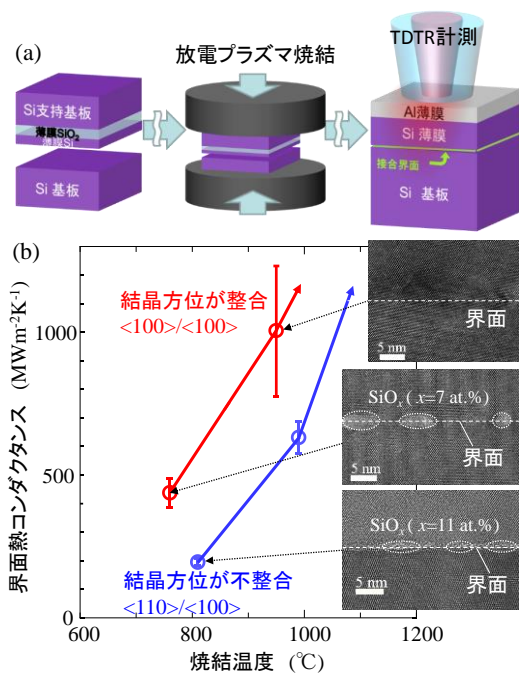


図3 Si-Si 焼結界面の界面熱コンダクタンス

ト層によってシリコン基板との接触面積が増えたためと考えられる。また、VGCF/アルミニウム試料表面にシリコンオイルを滴下した後の接触熱抵抗は、TIM部の厚さが500 μm の場合において、 $15.9 \text{ mm}^2\text{KW}^{-1}$ まで低減した。市販レベルのTIMの性能と比較すると、これは厚さ50 μm 、熱伝導率 $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ のTIMの熱抵抗と同等であり、今回の試料のTIM部の薄くすることで、既存のTIMを上回る性能が期待できる。例えば、厚さを50 μm とすると熱抵抗は $6.9 \text{ mm}^2\text{KW}^{-1}$ となることが見込まれる。

一方、CNTの熱電変換解析においては、欠陥導入に伴うCNTの電子コンダクタンスの急激により、CNTやCNTネットワークの熱電特性が悪化することが明らかになった。さらに、熱電特性の悪化はCNT長が短い程抑制されるが、欠陥の種類によりほぼ変化しないことも明らかになった。また、現実的なCNT内部の欠陥密度を考察した所、CNTの欠陥密度を抑制することで、2倍程度も熱電特性の性能指数を増加できる可能性を示した。

(5) フォノンの波動性を利用した熱伝導制御の実現に向けて研究を行った。そのためには、フォノンがコヒーレントである必要があるため、分子動力学法を用いて結晶材料(単結晶や超格子構造)のフォノンのコヒーレント長を計算した。その結果、コヒーレント長は、粒子的な描像におけるフォノンの平均自由行程とは異なり、その差は周波数に強く依存することがわかった。また、原子グリーン関数法やウェーブパケット法によって、フォノン透過関数を計算した結果、Si母材中にナノ粒子を埋め込むことで、フォノンの干渉効

果を発現できる可能性を示した。この干渉機構は構造の周期性を必要とせず、構造の乱れに対してロバストであることも示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Daisuke Aketo, Takuma Shiga, Junichiro Shiomi, "Scaling laws of cumulative thermal conductivity for short and long phonon mean free paths", *Applied Physics Letters* Vol. 105, 131901 (2014).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4896844>
- ② Takuru Murakami, Takuma Hori, Takuma Shiga, Junichiro Shiomi, "Probing and tuning inelastic phonon conduction across finite-length interface", *Applied Physics Express* Vol. 7, 121801 (2014).
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.7.121801>
- ③ Junichiro Shiomi, "Nonequilibrium molecular dynamics methods for heat conduction calculations", *Annual Review of Heat Transfer* Vol. 17, 177-203 (2014).
<http://dx.doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2014007407>
- ④ Masanori Sakata, Takuma Hori, Takafumi Oyake, Jeremie Maire, Masahiro Nomura, Junichiro Shiomi, "Controllability of thermal conductance across sintered silicon interface by local nanostructures", *Nano energy, Rapid communication*, Vol. 13, 601 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.03.038>
- ⑤ Takafumi Oyake, Masanori Sakata, Junichiro Shiomi "Nanoscale thermal conductivity spectroscopy by using gold nano-islands heat absorbers", *Applied Physics Letters* Vol. 106, 073102 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4913311>
- ⑥ Masanori Sakata, Takafumi Oyake, Jeremie Maire, Masahiro Nomura, Eiji Higurashi, Junichiro Shiomi, "Thermal conductance of interfaces directly bonded by room-temperature surface activation", *Applied Physics Letters*, Vol. 106, 081603 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4913675>
- ⑦ 山本佳亮, 志賀拓磨, 塩見淳一郎「高熱電変換性能ハーフホイスラー化合物の合金組成」*日本機械学会論文集*, Vol. 81, 842 (2015).
<http://ci.nii.ac.jp/loge/navi?name=crossref&id=info:doi/10.1299/transjsme.14-00652>
- ⑧ Takuma Hori, Junichiro Shiomi, Chris Dames, "Effective phonon mean free path in polycrystalline nanostructures", *Applied Physics Letters* Vol. 106, 171901 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4918703>
- ⑨ Asuka Miura, Zhou Shu, Tomohiro Nozaki, Junichiro Shiomi, "Crystalline amorphous

- nanostructures for bulk silicon thermoelectric materials with reduced thermal conductivity”, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 7, 13484 (2015).
- ⑩ Lei Feng, Takuma Shiga, Junichiro Shiomi, “Phonon transport in perovskite SrTiO₃ from first principles”, Applied Physics Express, Vol. 8, 071501 (2015).
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.8.071501>
- ⑪ Sebastian Volz, Junichiro Shiomi, Masahiro Nomura, Koji Miyazaki, “Heat conduction in nanostructured materials”, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 11, 1-15 (2016).
- ⑫ Susumu Yada, Takafumi Oyake, Masanori Sakata, Junichiro Shiomi, “Filler-depletion layer adjacent to interface impacts performance of thermal interface material”, AIP Advances 6, 015117 (2016).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4941354>.
- ⑬ Masanao Obori, Satoshi Nita, Asuka Miura, Junichiro Shiomi, “Onsite synthesis of thermally percolated nanocomposite for thermal interface material”, Journal of Applied Physics, Vol. 119, 055103 (2016).
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4941275>

[学会発表] (計 13件)

- ① [招待講演]塩見淳一郎「ナノスケールにおける熱伝導」2015年真空・表面科学合同講演会, つくば国際会議場, 12月1日(2015).
- ② [招待講演]ナノ・界面構造を用いたフォノンエンジニアリング」応用物理学会・応用電子物性分科会研究例会, 東京, 11月25日(2015).
- ③ [招待講演]塩見淳一郎, 「表面・界面を利用したナノスケール熱工学」, 日本表面科学会関東支部 第2回関東支部セミナー, 11月13日(2015)
- ④ [招待講演]塩見淳一郎「フォノン輸送の科学と制御、およびその応用」, 日本化学会R&D懇話会182回定例会, 東京, 9月11日(2015).
- ⑤ [招待講演]塩見淳一郎, 「ナノスケールにおける熱エネルギーの輸送と変換」, 化学工学会第47回秋季大会, 北海道大学, 9月10日(2015).
- ⑥ [招待講演]塩見淳一郎, 「ナノスケール熱輸送に関するシミュレーション」, 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会研究集会, 7月10日(2015).
- ⑦ [招待講演] Junichiro Shiomi, “Exploring controllability of thermal conductivity for high performance bulk silicon thermoelectric”, ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, Rutgers University, Piscataway, USA, , May 25th (2015).
- ⑧ [招待講演]塩見淳一郎, 「ナノ構造や界面

によるフォノン輸送制御」、応用物理学会、東海大学、東京、3月14日(2015)。

- ⑨ [招待講演] Junichiro Shiomi, Takuma Shiga, “Effect of phonon-blocking at sintered interfaces” American Physical Society March Meeting, San Antonio, USA, March 2 (2015).
- ⑩ [招待講演] 塩見淳一郎, 「フォノン輸送の視点からのナノ焼結体の熱伝導解析」, 第114回粉体粉末冶金協会秋季大会, 大阪大学、大阪、10月29日(2014).
- ⑪ [基調講演] Junichiro Shiomi, “Nanoscale thermal transport in thermoelectrics”, The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15), Kyoto, Japan August 12 (2014).
- ⑫ [招待講演] Junichiro Shiomi, “Phonon transport analysis of crystals with strong anharmonicity, disorders, interfaces, and nanostructures”, 8th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena -Science and Engineering -, Santa Cruz, USA, July 14 (2014).
- ⑬ [招待講演] Junichiro Shiomi, “Anharmonic phonon dynamics in bulk crystals and their interfaces”, 2nd International Conference on Phononics and Thermal Energy Science, Shanghai, China, May 28 (2014).

[図書] (計 5件)

- ① 塩見淳一郎, 「ナノスケールにおける半導体のフォノン熱伝導」, 伝熱, Vol. 55, 9-17 (2016).
- ② 塩見淳一郎, 「東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻・熱エネルギー工学 (塩見) 研究室の紹介」, 日本熱電学会誌, Vol. 12, 25-27 (2015).
- ③ 志賀拓磨、塩見淳一郎, 「第一原理熱伝導解析の現状と今後の展望」, 日本熱伝学会誌, Vol. 11, pp. 15-20 (2015).
- ④ 堀琢磨, 塩見淳一郎, 「フォノン輸送の視点からのナノ焼結体の熱伝導解析」, 粉体および粉末冶金, Vol. 62, pp.169-174 (2015).
- ⑤ 塩見淳一郎, 「熱電材料とナノ熱工学」, 応用物理, Vol. 83(6) (2014).

[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://www.phonon.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

塩見 淳一郎 (SHIOMI, Junichiro)
東京大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：40451786