

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06125

研究課題名(和文)近接場熱輻射の帯域制御手法の確立と熱光発電への展開

研究課題名(英文)Spectral control of near-field thermal radiation for highly efficient thermo-photovoltaic power generation

研究代表者

野田 進(NODA, Susumu)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10208358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 154,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温物体と受光素子を、中間基板を介して近接させるという独自の近接場熱輻射制御手法により、従来限界(黒体限界)を超える熱輻射を引き出す手法を確立し、高出力・高効率な熱光発電への展開の基礎を築くことを目的として、研究を推進した。その結果、近接場熱輻射制御に関する体系的な理論構築、さらにそれをもとに設計した高温(～1200 K)の熱輻射光源と室温の受光素子を、中間基板を介して距離140 nm以下に近接させた一体型熱光発電デバイスの開発に成功し、所望の帯域のみで近接場熱輻射を生じさせ、単一デバイスにおいて同温度の黒体限界を超える熱輻射および光電流を取り出すことに世界で初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近接場熱輻射制御に関する体系的な理論構築とともに、高温の熱輻射光源と室温の受光素子を、中間基板を介して距離140nm以下に近接させた一体型熱光発電デバイスの開発を通じて、黒体限界を超える熱輻射および光電流を得ることに成功した本成果は、世界的にも例が無く、学術的に極めて意義のある成果であると言える。さらに、黒体限界を超える光電流を取り出すことに成功したことは、現在の太陽光発電の効率を凌駕する超小型かつ高効率な次世代発電システムの実現にもつながる重要な成果と言え、太陽熱・地熱等の各種熱エネルギーの有効利用を可能とし、将来の脱炭素社会の実現に貢献出来ることが期待され、その社会的意義も大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed to establish a method of extracting thermal radiation that exceeds the conventional power limit (blackbody limit) by using a system in which a high-temperature emitter and a photovoltaic cell are brought into close proximity via an intermediate substrate, and to establish the foundation for the development of high-power, high-efficiency thermophotovoltaic power generation systems. As a result, we have developed a systematic theory of near-field thermal radiation control and fabricated a near-field thermophotovoltaic device that integrated a high-temperature (up to 1200 K) thermal emitter and a room-temperature photovoltaic cell with a sub-wavelength gap (<140 nm). By using the developed device, we have succeeded for the first time in extracting near-field thermal radiation and photocurrent exceeding the blackbody limit in a single device.

研究分野：光工学および光量子科学

キーワード：熱輻射制御 近接場 フォトニック結晶 熱光発電 太陽電池 半導体

1. 研究開始当初の背景

高温物体から生じる熱輻射は、簡便に様々な波長域の光を生成できるという利点ゆえ、発電、赤外分光、環境センサなど多岐にわたる用途に利用される。しかしながら、一般的な物体の熱輻射スペクトルは幅広く、かつ輻射強度の上限が同温度の黒体輻射強度（黒体限界）で制限されるため、個々の応用におけるエネルギー密度やエネルギー利用効率が低いという課題が存在していた。従って、高温の物体から生じる熱輻射を、必要な波長域のみで発生させ、かつ上記の黒体限界を超えて伝達させる技術を確認することは、熱輻射を利用した発電（熱光発電）の大幅な高出力化・高効率化を含む、各種熱エネルギーの有効利用にとって極めて重要と言える。

上述の熱輻射制御技術の確認を目指し、本基盤研究S開始前に、研究代表者等は、物質の光吸収係数（電子状態）と物体内の光状態密度（光子状態）の両者を制御することで、特定の帯域のみに熱輻射を集約するという独自の概念を提唱し、熱光発電応用を見据えて、太陽電池の光電変換効率が最大となる近赤外域のみで輻射する狭帯域熱輻射光源の開発等を進めていた。具体的には、近赤外域でバンド間遷移による光吸収を示すシリコンを用いて、独自のフォトニック結晶を開発し、温度 1300 K にて、波長 1 μm 近傍の近赤外域で、狭帯域な熱輻射を実現する等、世界を牽引する多くの成果を得ていた。しかしながら、上述の通り、物体から自由空間に取り出される熱輻射強度は、同温度の黒体輻射強度を超えられないため、上記の光源において近赤外域で得られる熱輻射パワーは十分ではなく、熱光発電に応用した際に得られる光電流密度は十分とは言えない状況にあった。また、太陽電池を透過する長波長の熱輻射成分も相対的に大きく、そのままでは熱光発電の高出力化・高効率化へ向けた展開が困難な状況であった。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、高温物体と受光素子を、中間基板を介して近接させるという独自の近接場熱輻射制御法の着想のもと、所望の帯域のみで黒体限界を超える熱輻射を引き出す技術を確認し、高出力・高効率な熱光発電への展開の基礎を築くことを目指した。具体的な研究目標（当初目標）を以下に示す。

(1) フォトニック結晶による近接場熱輻射制御の体系的理論構築：熱輻射光源と受光素子を、中間基板を介して近接させた際に生じる近接場熱輻射伝達スペクトルの解析手法を構築するとともに、フォトニック結晶に代表される光の状態密度を制御可能な構造を利用した熱輻射スペクトル制御法に関する体系的な理解を可能とする理論構築を第1の目標とした。

(2) 光源・受光素子対の近接場結合法の確立：近接場光による熱輻射伝達を利用するためには、光源と受光素子の近接距離を 100~200 nm 程度に維持したまま、熱輻射光源を 1000 K 以上の高温まで加熱する必要がある。そこで、高温に加熱された光源の応力変形および熱伝導損失が抑制可能な光源支持構造の作製手法を確認するとともに、熱輻射光源と受光素子間の距離の精密な制御手法の確認を目指すことを第2の目標とした。

(3) 黒体限界を超える近赤外狭帯域熱輻射伝達の実証および熱光発電への展開：(1)で設計した光源・受光素子構造を、(2)で確立した手法で近接させ、受光素子の光電流が、空隙幅の減少に伴い大幅に増大し、同温度の黒体限界を超えることを実証すること、すなわち、光源と受光素子を、中間基板を介して一体化したシステムを構築して、熱光発電試験を行い、光源の加熱パワーから狭帯域な近赤外熱輻射への高効率変換を実現することを第3の目標とした。

以上の3つの目標を達成することで、所望の帯域のみで従来限界（黒体限界）を超える熱輻射を生じさせる手法を確認し、高出力・高効率な熱光発電への展開の基礎を築くことを目指した。

3. 研究の方法

(1)理論解析：近接場熱輻射伝達スペクトルの解析には、揺動散逸定理と厳密結合波解析を組み合わせた独自の解析手法を用いた。

(2)試料作製：熱輻射光源については高抵抗 Si を、受光素子としては InGaAs/InP を用いた。試料作製においては、電子ビーム露光装置、ICP エッチング装置、無水フッ酸エッチング装置等の半導体精密加工装置を用いた。

(3)光学特性評価：作製試料の加熱実験は、研究期間内に構築した近接場熱輻射測定系により行った。光源の高温加熱は真空チャンバー内でレーザー照射等により行い、光源温度および光源・受光素子間距離の測定は、赤外線カメラによる直接観察および光源の反射スペクトルの分光測定により行った。

4. 研究成果

(1) フォトニック結晶による近接場熱輻射制御の体系的理論構築

まず、近接場熱輻射スペクトルの一般的な解析手法を構築するため、揺動散逸定理と厳密結合波解析を複合した独自の解析手法を確認した[Opt. Express, vol. 26, pp. A192 (2018)]. 本手

法の構築により、フォトニック結晶等の光の状態密度を制御可能な物体を用いた場合の近接場熱輻射スペクトルについての定量的な議論が初めて可能となった。次に、1次元周期のフォトニック結晶 Si 熱輻射光源と InGaAs 太陽電池を、透明中間基板 (Si) を介して近接させた具体的な近接場熱光発電システム (図 1(a)) の設計・解析を行った。設計したシステムにおいて、近接距離 d を 100 nm とした場合の熱輻射スペクトルの計算結果を図 1(b) に示す。InGaAs 太陽電池の発電に寄与する帯域において、近接場効果とフォトニック結晶のバンド折り返しによる状態密度制御により、同温度の黒体限界を超えるパワーが光源から太陽電池 (InGaAs 層) へ伝達可能であることがわかった。このとき、全熱輻射パワーに対する発電に寄与する熱輻射パワーの割合 (スペクトル効率) を、近接距離を変えて計算した結果を図 1(c) に示す。太陽電池と光源を直接近づける従来方式 (黒線) では、距離 100 nm 程度まではスペクトル効率が增大するが、更に距離を近づけると発電に寄与しない太陽電池表面層への長波長熱輻射伝達が大きくなり、スペクトル効率は減少に転じる。一方、中間基板を導入しつつ、フォトニック結晶等の状態密度を制御可能な光源を導入するという本研究の提案方式 (赤線) では、太陽電池表面層への長波長熱輻射伝達の抑制と、バンド折り返し効果による発電帯域の熱輻射伝達の増強が生じ、近接距離 100 nm 以下でもスペクトル効率が増加し続けることが明らかとなった。また、Si 光源に 2次元周期のフォトニック結晶を導入した場合の近接場熱輻射スペクトル解析も行った結果、光源の厚さを 300 nm 以下まで薄くした場合に、フォトニック結晶のフラットバンド帯域で波長選択的に黒体限界を超えて熱輻射を太陽電池側へと引き出すことが可能であることが判明し、同体積の Si 平板と比較して、5 倍以上の熱輻射スペクトルの狭帯域化が実現しうることも見出した [Opt. Express, vol. 26, pp. 32074 (2018)]。以上の理論解析により、近接場熱光発電システムにおいて、中間基板とともに、フォトニック結晶等の状態密度制御構造の導入が、近接場熱輻射スペクトルの帯域制御や、ひいては熱光発電の発電効率向上に寄与することを、世界で初めて定量的に示すことに成功した。

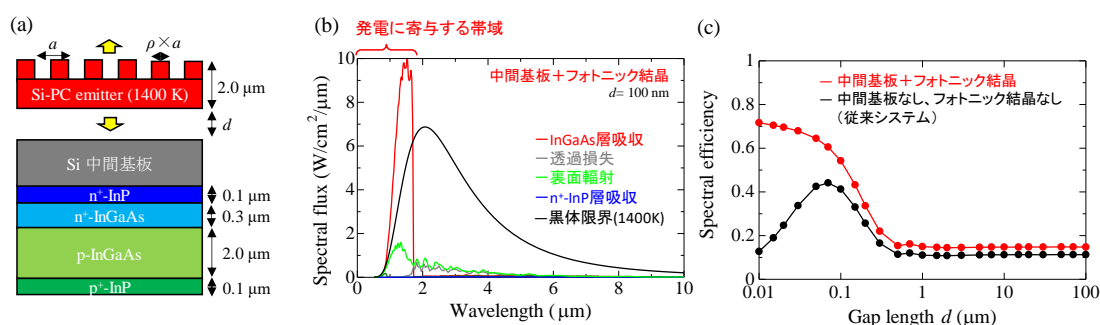


図 1. (a) 提案する近接場熱光発電システムの解析モデル (b) 1次元周期のフォトニック結晶熱輻射光源から生じる近接場熱輻射スペクトルの解析結果 (光源温度 1400 K, 近接距離 100 nm) (c) スペクトル効率の近接距離依存性の解析結果。

(2) 光源・受光素子対の近接場結合法の確立

本項目では、上記の近接場熱輻射制御の実験的検証を可能とするべく、熱輻射光源を 1000 K 以上の高温まで加熱しつつ、熱輻射光源と受光素子 (中間基板) の距離を 100~200 nm 程度になるまで近接させる手法の確立を目指した。はじめに、熱膨張による垂直方向への変形を極力抑制出来る光源構造を有限要素法により設計した結果、光源を1本の細い梁で支持する構造 (一本梁構造) と、複数の細長い梁で四方向から光源を支持する構造 (多重梁構造) において、1300 K 以上に光源を加熱した際の垂直変位を 100 nm 未満に抑制可能であることを見出した。さらに、設計構造について、SOI (Silicon on Insulator) 基板を用いた作製プロセスを確立し、設計通りの光源構造の作製に成功した (一本梁構造の作製例を図 2(a) に示す)。次に、項目 (1) で設計した、Si 中間基板を接合した InGaAs 太陽電池構造の作製に取り組み、SOI 基板と InGaAs/InP 基板のプラズマ活性化接合を利用することで同構造の作製に成功した (図 2(b))。続いて、作製した光源と太陽電池を、ピエゾステージ等を用いずに、ウエハ融着により予め微小空隙を残して一体化したデバイス (図 2(c)) の作製プロセスを開発した。さらに、同デバイスの近接距離分布を測定したところ、図 2(d) に示すように、光源を 1000 K 以上に加熱した状態で、光源と太陽電池間の平均近接距離 140 nm を達成することに成功した。なお、現状のデバイスでは、光源の支持構造を介した熱伝導損失等、本質的ではないエネルギー損失が存在するが、今後、デバイスのさらなる大面積化等の工夫により、これらの損失の占める割合を減少させることが可能である。実際に、別途行った遠方場熱光発電の検討では、光源の熱伝導損失を最小化するシステム設計により、熱から電力への変換効率として世界最高効率の 11.2% を達成した [ACS Photonics, Vol. 7, pp. 80 (2020)]。

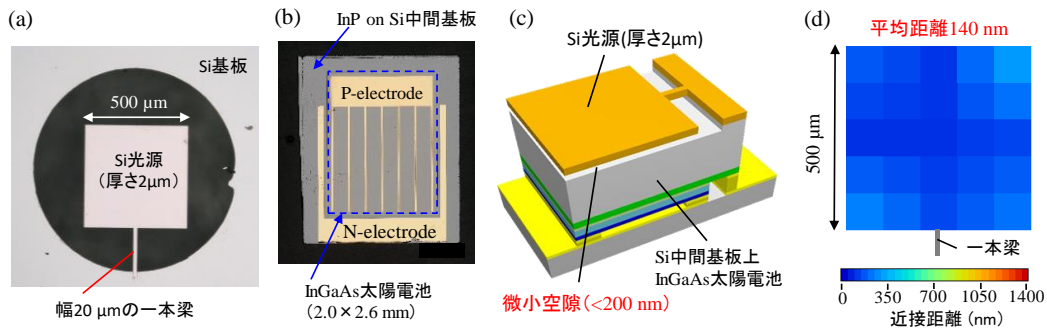


図 2. (a) 作製に成功した薄膜 Si 熱輻射光源の顕微鏡写真 (b) 作製に成功した Si 中間基板上 InGaAs 太陽電池の顕微鏡写真 (c) 熱輻射光源・太陽電池一体型近接場デバイスの模式図 (d) 平均光源温度 1040 K 時の近接距離分布の測定結果。

(3) 黒体限界を超える近赤外狭帯域熱輻射伝達の実証および熱光発電への展開

① 近接場熱輻射増強による大幅な光電流増強の実証

(2) で開発した薄膜 Si 熱輻射光源・太陽電池一体型近接場デバイスについて、光源・太陽電池間の平均近接距離が異なる 2 つのデバイス (A: 平均近接距離 140 nm, B: 平均近接距離 1160 nm) を作製し、両者が等しい光源温度になるように光源を加熱した状態で、太陽電池の電流電圧特性を測定した。その結果、光源温度 1040 K において、近接距離を 140 nm まで近づけることで、太陽電池の短絡電流が 10 倍以上に増強されることを実証することに成功した [図 3(a)]。また、短絡電流の温度依存性の測定結果が、項目 (1) で確立した解析手法による計算結果とよく一致した [図 3(b)]。以上から、近接場光による近赤外域の大幅な (>10 倍) 熱輻射増強効果の実証に成功した [Nano Lett., vol. 19, pp. 3948 (2019)]。

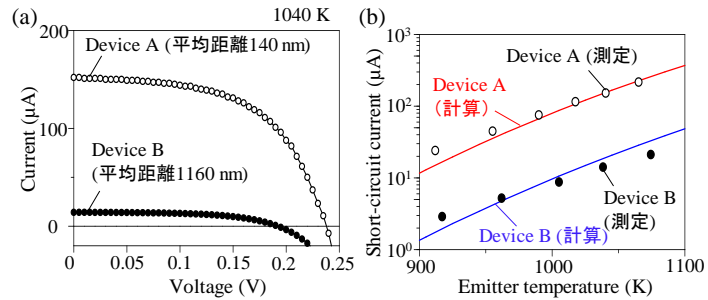


図 3. (a) 近接距離の異なる熱光発電デバイスの電流電圧特性の測定結果 (b) 短絡電流の光源温度依存性の測定結果および計算結果。

② 黒体限界を超える光電流を生成可能な一体型熱光発電デバイスの実証

①の実証結果を踏まえ、本研究課題の最終目標である、黒体限界を超える近赤外狭帯域熱輻射伝達の実証に取り組んだ。ここでは、近接場熱輻射伝達のパワー密度をさらに向上するべく、Si 熱輻射光源の光源厚さの厚膜化 (具体的には厚さ 2 μm ⇒ 20 μm) に取り組んだ。光源の厚膜化により、光源内部の光状態密度が大幅に増大するため、近接場光を介して受光素子側に伝達される熱輻射のパワー密度が、それに比例して増大するものと期待される。図 4(a) に、新たに設計・作製した近接場熱光発電デバイスの模式図を示す。本デバイスでは、光源の厚さを増加させたことで、光の状態密度のみならず、光源の堅牢性も向上すると期待されるため、光源の大きさを 500 μm 角から 1 mm 角に拡大することとした。また、光源支持構造としては、図 3 の一本梁構造ではなく、四隅から幅の狭い梁で支える多重梁構造を採用することで、高温に加熱した際の光源の熱応力を水平方向に均等に緩和し、高温時 (~1200 K) にも熱輻射光源と中間基板の微小空隙 (~140 nm) を維持出来るように工夫した。作製した新たなデバイスを加熱した際に得られる光電流密度の光源温度

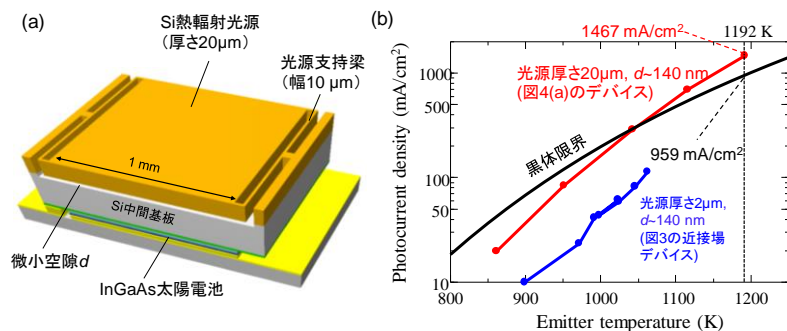


図 4. (a) 黒体限界を超える厚膜 Si 近接場熱光発電デバイスの模式図 (b) 作製した近接場熱光発電デバイスにおいて得られた光電流密度の光源温度依存性。光源厚さ 20 μm のデバイスにおいて、光源温度 1050 K 以上にて、黒体限界を超える光電流密度を生成することに成功した。

依存性の測定結果を図 4(b)の赤線に示す。同図には、図 3 に示した光源厚さ $2\ \mu\text{m}$ の近接場デバイスで得られた光電流密度の測定結果も青線で示しているが、光源厚さを増大させることで、さらに 3~5 倍の光電流密度の増強が得られていることがわかる。さらに、同温度の黒体限界で決まる光電流密度の従来限界（黒線）と比較すると、光源温度 1050 K 以上において、まさに、黒体限界を超える光電流密度の生成に成功出来ていることがわかる。光源温度 1192 K で比較すると、黒体限界 ($959\ \text{mA}/\text{cm}^2$) の 1.5 倍 ($1467\ \text{mA}/\text{cm}^2$) の光電流密度が得られており、この値は、通常の太陽光発電の光電流密度 (約 $40\ \text{mA}/\text{cm}^2$) と比較して 30 倍以上大きい値である。以上より、黒体限界を超える高密度の光電流を生成可能な熱輻射光源/太陽電池一体型熱光発電デバイスの開発に世界で初めて成功したと言える。本成果は、米国科学誌 ACS Photonics [ACS Photonics vol. 8, pp. 2466 (2021)]に掲載されるとともに、毎日新聞、テレビ大阪を始めとする多数のメディアで報道され、極めて大きな注目を集めた。

(4) リサイクル式近接場熱光発電システムの提案・解析・実証（当初計画を超える成果）

(1)~(3)に記載の通り、本研究では当初目標を全て達成することが出来たが、その過程で、当初に予見していなかった新たな展開として、近接場熱光発電システムに、不要な熱輻射を光源側に戻すための反射鏡を導入した「リサイクル式近接場熱光発電システム」を考案し、その詳細な理論解析および原理実証実験をも行うことができた。図 5(a)に、新たに考案したリサイクル式近接場熱光発電システムの模式図を示す。Si 熱輻射光源と InGaAs 太陽電池を Si 中間基板を介して近接させたデバイスの基本構造は、前述したシステムと同じであるが、システムの上部に反射鏡を配置して、システム外への熱輻射を光源側に回収することで、光源の加熱に必要なパワーを減少し、発電効率を向上させる工夫をしている。同システムにおいて、上部反射鏡の等価反射率（開口率を考慮した反射率）を理想的な値 (0.99) および現実的な値 (0.90) に設定し、光源と中間基板間の空隙長 d を変化させて理想太陽電池の発電効率を計算した結果を図 5(b)に示す。同図より、空隙長が小さい近接場熱光発電システムにおいては、遠方場熱光発電システムと比較して、上部反射率の等価反射率が 0.90 まで低下したとしても、高い発電効率 (~40%) を維持可能であることが判明した。これは、近接場熱光発電システムでは、発電に寄与する近赤外域の熱輻射伝達を、黒体限界を超えて増強しているため、上部反射鏡の反射率の低下によるシステム外への熱輻射損失の増加の影響が相対的に小さくなるためと考えられる。本解析結果は、高出力かつ超高効率 (>40%) な熱光発電システムを実現する上で極めて重要な指針を与える結果であるといえ、本成果は、2021 年に Optics Express に論文が掲載された [Optics Express, vol. 29, pp. 11133 (2021)]。さらに、極最近、上記の高出力・高効率なリサイクル式近接場熱光発電システムの実現に向けて、反射鏡を用いた輻射リサイクリングの原理実証実験に成功した。具体的には、図 4 に模式図を示した一体型熱光発電デバイスの上部に、開口を有する Au 反射鏡を配置して発電実験を行い、上部反射鏡導入の効果を定量的に調べた。まず、光源加熱パワーを一定 (約 90 mW) にして、上部反射鏡の有無を変化させて、光源中心温度を測定したところ、上部反射鏡を導入した場合に、反射鏡を導入しない場合と比較して、光源中心温度が約 100 K 上昇することが確認出来た。これは、光源上部への熱輻射が反射鏡によって光源側に回収されたためと考えられる。さらに、上部反射鏡の有る場合と無い場合について、光源加熱パワーを変化させながら、短絡電流密度を測定した結果を図 5(c)に示す。同じ加熱パワーを投入した際に、上述した光源温度の上昇に起因して、太陽電池にて得られる短絡電流密度が約 2.2 倍に向上することが確認され、輻射リサイクリングによる熱光発電システムの高出力化・高効率化の原理実証に成功した。

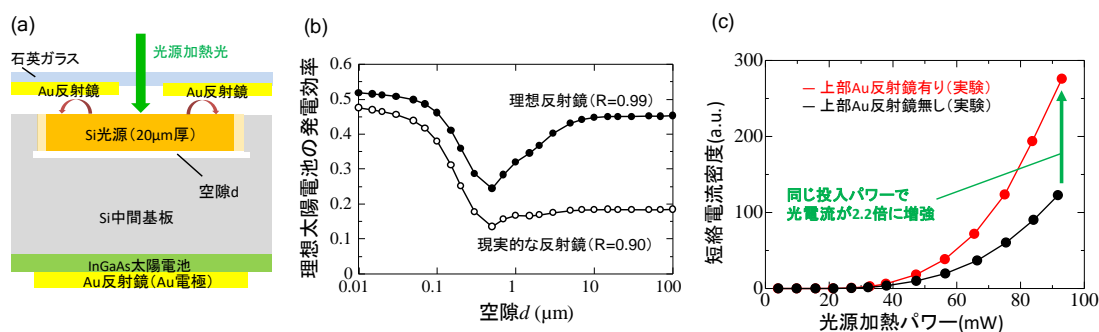


図 5. (a) リサイクル式近接場熱光発電システムの模式図 (b) 理想太陽電池における発電効率の空隙長依存性の計算結果 (c) 上部反射鏡を用いた輻射リサイクリングによる短絡電流密度増強の初期実証結果。

以上、(1)~(4)で述べたように、本研究で目的とした超高出力・高効率近接場熱光発電の実現の基礎を築くことが出来たと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Inoue Takuya, Ikeda Keisuke, Song Bongshik, Suzuki Taiju, Ishino Koya, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 8
2. 論文標題 Integrated Near-Field Thermophotovoltaic Device Overcoming Blackbody Limit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 2466 ~ 2472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.1c00698	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 Inoue Takuya, Suzuki Taiju, Ikeda Keisuke, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 29
2. 論文標題 Near-field thermophotovoltaic devices with surrounding non-contact reflectors for efficient photon recycling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 11133 ~ 11143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.419529	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 浅野 卓、末光 真大、井上 卓也、野田 進	4. 巻 90
2. 論文標題 フォトニック結晶を用いた熱輻射制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 162 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.3_162	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 Suemitsu Masahiro, Asano Takashi, Inoue Takuya, Noda Susumu	4. 巻 7
2. 論文標題 High-Efficiency Thermophotovoltaic System That Employs an Emitter Based on a Silicon Rod-Type Photonic Crystal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 80 ~ 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.9b00984	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 Inoue Takuya, Koyama Takaaki, Kang Dongyeon Daniel, Ikeda Keisuke, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 19
2. 論文標題 One-Chip Near-Field Thermophotovoltaic Device Integrating a Thin-Film Thermal Emitter and Photovoltaic Cell	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3948 ~ 3952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b01234	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 Kang Dongyeon Daniel, Inoue Takuya, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 6
2. 論文標題 Electrical Modulation of Narrowband GaN/AlGaIn Quantum-Well Photonic Crystal Thermal Emitters in Mid-Wavelength Infrared	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1565 ~ 1571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.9b00440	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 Inoue Takuya, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 26
2. 論文標題 Spectral control of near-field thermal radiation via photonic band engineering of two-dimensional photonic crystal slabs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 32074 ~ 32082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.032074	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 INOUE Takuya, DE ZOYSA Menaka, ASANO Takashi, NODA Susumu	4. 巻 E101.C
2. 論文標題 Wavelength-Switchable Mid-Infrared Narrowband Thermal Emitters Based on Quantum Wells and Photonic Crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 545 ~ 552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E101.C.545	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 Takuya Inoue, Kohei Watanabe, Takashi Asano, Susumu Noda	4. 巻 26
2. 論文標題 Near-field thermophotovoltaic energy conversion using an intermediate transparent substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 A192 ~ A208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.00A192	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 Masahiro Suemitsu, Takashi Asano, Menaka De Zoysa, Susumu Noda	4. 巻 112
2. 論文標題 Wavelength-selective thermal emitters using Si-rods on MgO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 011103-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5010805	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 Daniel Dongyeon Kang, Takuya Inoue, Takashi Asano, Susumu Noda	4. 巻 8
2. 論文標題 GaN/AlGaIn photonic crystal narrowband thermal emitters on a semi-transparent low-refractive-index substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015221-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5019387	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 Dongyeon Kang, Takuya Inoue, Takashi Asano, Susumu Noda	4. 巻 110
2. 論文標題 Demonstration of a mid-wavelength infrared narrowband thermal emitter based on GaN/AlGaIn quantum wells and a photonic crystal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 181109-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4983020	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67件（うち招待講演 29件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 Takuya Inoue, Takashi Asano and Susumu Noda
2. 発表標題 Development of one-chip near-field thermophotovoltaic device overcoming far-field blackbody limit
3. 学会等名 The 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 卓也, 浅野 卓, 野田 進
2. 発表標題 ナノプロセス技術による自在な熱輻射制御と熱光発電への展開
3. 学会等名 京都大学テクノサイエンスヒル柱の実VOL.3 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野 卓
2. 発表標題 フォトニックナノ構造による熱輻射制御
3. 学会等名 応用電子物性分科会研究例会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Inoue, Masahiro Suemitsu, Takashi Asano, and Susumu Noda
2. 発表標題 Far-field and near-field thermophotovoltaic systems based on intrinsic silicon thermal emitters
3. 学会等名 European-MRS Spring Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Susumu Noda
2. 発表標題 Progress in Photonic Crystals -From Fundamental to State of the Arts for Society 5.0 -
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野 卓
2. 発表標題 フォトニック結晶を用いた熱輻射制御
3. 学会等名 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野 卓
2. 発表標題 フォトニック結晶を用いた熱輻射制御
3. 学会等名 阪大CSRN 第二回異分野研究交流会 「半導体・ナノカーボン系」 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 進
2. 発表標題 光を操る技術が未来を拓く
3. 学会等名 一般財団法人光産業技術振興協会 2020年度多元技術融合光プロセス研究会第1回研究交流会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Susumu Noda
2. 発表標題 Progress in photonic crystals
3. 学会等名 The 4th POSTECH nanophotonics tutorial workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Susumu Noda
2. 発表標題 Progress in photonic crystals
3. 学会等名 The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上卓也
2. 発表標題 半導体フォトニック結晶による熱輻射制御
3. 学会等名 PCoMSシンポジウム&計算物質科学スーパーコンピュータ共用事業報告会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Suemitsu, Takashi Asano and Susumu Noda
2. 発表標題 Near-infrared selective thermal emitter for thermo-photovoltaic energy conversion system
3. 学会等名 The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田進
2. 発表標題 超スマート社会とフォトニック結晶
3. 学会等名 光・レーザー関西2019開催記念 公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Susumu Noda
2. 発表標題 Two decades of progress for photonic crystals: from the realization of complete 3D crystals to the state of the art for society 5.0
3. 学会等名 2019 SPIE Photonic West (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Susumu Noda
2. 発表標題 Present State and Future Prospects of Manipulating Photons with Photonic Crystals -Towards Social Application-
3. 学会等名 KSOP Summer School 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅野 卓, 末光 真大, 井上 卓也, 野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶と半導体を用いた熱輻射制御
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2018 (OPJ2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶による光制御の進展
3. 学会等名 第374回蛍光体同学会講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶技術の現状と将来展望
3. 学会等名 第27回光ものづくりセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末光 真大, 浅野 卓, 井上 卓也, 野田 進
2. 発表標題 高変換効率熱光発電システムの構築
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Susumu Noda
2. 発表標題 Progress in Photonic Crystals
3. 学会等名 International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN18)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Asano, Masahiro Suemitsu, Takuya Inoue, Susumu Noda
2. 発表標題 Thermal emission control by semiconductor photonic crystals
3. 学会等名 META 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Asano, Takuya Inoue, Susumu Noda
2. 発表標題 Narrowband thermal emitters based on photonic crystals
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野田進
2. 発表標題 フォトリック結晶が切り拓く新しい光技術と産業
3. 学会等名 京都高度技術研究所「次世代光学製品共創ネットワーク構築」フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上卓也
2. 発表標題 電子状態・光子状態操作による熱輻射制御
3. 学会等名 第10回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅野卓, 井上卓也, 末光真大, 野田進
2. 発表標題 III-VおよびSiからなるフォトニック結晶構造を用いた熱輻射光源
3. 学会等名 第27回シリコンフォトニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅野卓, 井上卓也, 末光真大, 野田進
2. 発表標題 熱エネルギーの狭帯域な熱輻射への変換
3. 学会等名 第15回関西伝熱セミナー (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 熱輻射光発電装置	発明者 野田進、井上卓也、 渡辺晃平、浅野卓	権利者 国立大学法人京 都大学
産業財産権の種類、番号 特許、第6846035号	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

黒体限界を超える高密度の光電流を生成可能な熱輻射光源 / 太陽電池一体型熱光発電デバイスの開発に成功
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-08-11>
 テレビ大阪ニュース「京大が開発 熱光発電で効率アップ」
<https://www.youtube.com/watch?v=CqJUTnVvJ7Q>
 黒体限界を超える光電流を生成可能な近接場熱光発電デバイスの実証に関する研究成果について、毎日新聞、テレビ大阪、日刊工業新聞、日経産業新聞、京都新聞をはじめとして、多数のメディアにて報道された。報道の詳細は以下のホームページに記載。
 野田研究室：<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.php?%E5%A0%B1%E9%81%93>

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	浅野 卓 (ASANO Takashi) (30332729)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	井上 卓也 (INOUE Takuya) (70793800)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

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