

# フォトニックナノ構造による熱輻射制御と熱光発電への展開

井上 卓也<sup>1</sup>, 末光 真大<sup>2,3</sup>, 浅野 卓<sup>1</sup>, 野田 進<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 工学研究科 (〒 615-8510 京都市西京区 京都大学桂)

<sup>2</sup> 大阪ガス株式会社 エネルギー技術研究所 (〒 541-0046 大阪市此花区西島 6-19-9)

<sup>3</sup> SPACECOOL 株式会社 (〒 105-6404 東京都港区虎ノ門 1-17-1 虎ノ門ヒルズビジネスタワー4 階 ARCH 内)

## Thermal Emission Control Based on Photonic Nanostructures and Application to Thermophotovoltaic Power Generation

Takuya INOUE,<sup>1</sup> Masahiro SUEMITSU,<sup>2,3</sup> Takashi ASANO,<sup>1</sup> and Susumu NODA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kyoto University, Kyoto-daigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510

<sup>2</sup> Osaka Gas Inc., 6-19-9 Torijima, Konohana-ku, Osaka 541-0046

<sup>3</sup> SPACECOOL Inc., ARCH Toranomon Hills Business Tower, 1-17-1, Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-6404

(Received September 2, 2022)

Thermophotovoltaic (TPV) systems, which convert heat into electricity by irradiating PV cells with thermal emission from heated objects, feature their high output power density and potentially high conversion efficiency. To increase the output power density and conversion efficiency of TPV systems, it is important to enhance the thermal emission above the bandgap energy of the PV cell while suppressing the emission below it. Here, we show our recent experimental demonstrations of far-field and near-field TPV systems based on photonic nanostructures. In the far-field experiment, we develop silicon rod-type photonic-crystal thermal emitters which exhibit near-infrared frequency-selective thermal emission with suppressed background emission, and demonstrate a heat-to-electrical conversion efficiency of 11.2% at 1338 K. In the near-field experiment, we develop a one-chip near-field TPV device integrating a thin-film Si emitter and InGaAs PV cell with a deep sub-wavelength gap (<150 nm), achieving photocurrent generation overcoming the far-field blackbody limit at 1192 K.

**Key Words:** Thermal emission control, TPV, Photonic crystal, Near-field

### 1. はじめに

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、環境センシングなど多岐にわたる用途に利用される。なかでも、高温物体の熱輻射を太陽電池に照射することで発電を行う熱光発電<sup>1,2)</sup>は、太陽熱や廃熱をはじめとする様々な形態の熱エネルギーから電気エネルギーを生み出すことが出来るため、持続可能な社会の実現を支える次世代の発電方式の1つとして、近年注目を集めている。しかしながら、一般的な物体から生じる熱輻射スペクトルは、太陽電池の光電変換帯域と比べて広帯域であるため、そのままでは大部分の熱輻射を発電に利用することが出来ず、低いエネルギー変換効率しか得られない。この課題を解決するためには、Fig. 1 に示すように、物体から生じる熱輻射を、所望の帯域に集中したスペクトルに変換する制御が必要となる。具体的には、太陽電池のバンドギャップ波長より少し短波長側の帯域の熱輻射強度を増強するとともに、その他の帯域(特に太陽電池を透過す

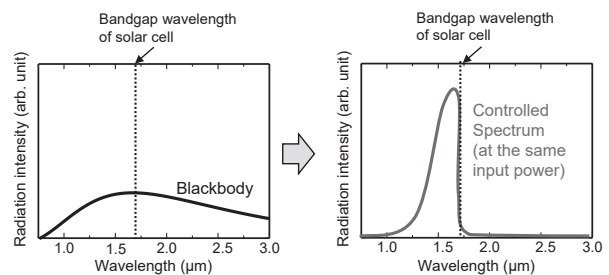


Fig. 1 Schematic of thermal emission control for thermophotovoltaic applications.

る長波長帯域)の熱輻射を出来る限り抑制することが重要であり、これにより、発電に寄与する熱輻射パワーの割合を大幅に増大することが出来る。

Fig. 1 に示すような熱輻射スペクトルの制御を等価的に実現する手法の1つとして、太陽電池の裏面に高反射層を設け、太陽電池を透過する長波長の熱輻射成分を熱輻射光源側に戻してエネルギーを再回収する手法が挙げられる<sup>1,3-5)</sup>。しかしながら、本手法では、太陽電池で反

射された光を、系の外部に散逸させることなく、全て熱輻射光源に戻す工夫が必要となるため、システム全体の設計が非常に複雑となる。そのため、本手法に関する研究報告のほとんどは、高反射層を設けた太陽電池単体での効率の評価に留まる。それに対し、熱輻射光源の輻射スペクトル自体を Fig. 1 のように狭帯域に制御することが出来れば、より単純でコンパクトなシステムでの高効率な熱光発電の実現が期待される。本論文では、後者の熱輻射スペクトル制御に関して、詳細に議論を行う。

一般に、ある温度の物体から自由空間へと取り出される熱輻射の上限はプランクの輻射則で表される黒体輻射スペクトルとなることが知られているが、これは全ての波長において物体内部で光と物質が十分に相互作用して平衡状態に達したときの強度を表す。実際の物体では、光と物質の相互作用の大きさが有限であることに起因して、自由空間へと取り出される熱輻射強度は常に黒体輻射強度よりも小さくなり、定量的には、光の吸収率に比例して輻射強度が決定される(キルヒホッフの法則)<sup>6,7)</sup>。従って、所望の波長における光の吸収率を1に近づけ、逆にその他の波長における吸収率を出来る限り抑制することで、所望の波長のみで黒体輻射強度に近づく狭帯域な熱輻射スペクトルが実現可能になる。我々は、熱輻射制御を実現する手法として、物体を構成する材料の吸収係数スペクトル自体の制御と、フォトニック結晶等の光学微細構造による光子状態の制御を組み合わせた独自の手法を提案・実証してきた<sup>8-10)</sup>。例えば、赤外分光や環境センシング応用で重要となる中赤外線領域において、量子井戸のサブバンド間遷移と、フォトニック結晶の共振モードを利用した熱輻射光源を開発することで、黒体輻射スペクトルと比較して1/100以下の狭線幅スペクトルの実証やその高速制御に成功している<sup>9,10)</sup>。また、本制御手法を、近赤外域へと展開することで、熱光発電への応用が可能な近赤外狭帯域熱輻射光源の開発にも成功している<sup>11-13)</sup>。

一方で、自由空間に取り出すことが出来る熱輻射強度は、同温度の黒体輻射強度(黒体限界)で制限される。全ての物体には、昇温可能な温度の上限が存在することから、熱光発電で得られる発電パワー密度も、上記の黒体限界により制限されることがわかる。この課題を克服するために、我々は、近接場光を利用した熱輻射伝達の増強を活用した熱光発電実現に向けた研究をも進めている<sup>14-17)</sup>。一般に、媒質内を伝搬する熱輻射パワーの上限は、その媒質中の光の状態密度(屈折率の3乗に比例)と光速(屈折率に反比例)の積に比例(屈折率の2乗に比例)するため、屈折率の大きな2つの媒質を光の波長以下の微小距離まで近接させ、その間で近接場光を介して直接熱輻射を伝達させることが出来れば、自由空間の黒体限界に制約されない、大幅な熱輻射伝達の増強が期待できる。さらに、本手法と前述した熱輻射スペクトル制御を組み合わせ、所望の波長のみで黒体輻射限界を超えた熱輻射を利用することができれば、熱光発電の高出力・高効率化をはじめとして、各種熱エネルギーの有効利用が実現することが期待される。

以上の背景を踏まえ、本稿では、我々のこれまでのフォトニックナノ構造を用いた熱輻射制御に関する研究のうち、特に熱光発電への展開に関する取り組みを紹介する。はじめに、Si フォトニック結晶に基づく近赤外狭帯域熱輻射光源を実現し、それを利用して高効率な熱光発電システムを実証した結果を紹介する<sup>11-13)</sup>。次に、熱光発電システムのさらなる高出力密度化に向けて、ナノギャップにおける近接場熱輻射伝達を利用した熱光発電デバイスを開発し、同温度の黒体輻射限界を超える光電流の生成に成功した結果について紹介する<sup>15,16)</sup>。

## 2. Si フォトニック結晶に基づく近赤外線狭帯域熱輻射光源の開発と熱光発電への展開

### 2.1 Si フォトニック結晶熱輻射光源の開発

熱光発電応用においては、太陽電池のバンドギャップ波長に相当する近赤外域において選択的に輻射する熱輻射光源の開発が重要であり、そのためには、1000 °C 以上の高温で使用可能であり、かつ近赤外光に対する吸収率の大きな材料・構造が必要となる。これらの要求を満たすため、我々は Fig. 2(a) に示すように、Si を材料としたロッド型フォトニック結晶光源の開発を進めてきた<sup>11,12)</sup>。Si は、融点が1400 °C 程度と高く、高温動作可能であるとともに、バンド間遷移により可視・近赤外領域で大きな光吸収係数を示す。ただし、Si は高温にすると真性キャリアが生じて、長波長域でも光吸収(熱輻射)を生じるようになるため、長波長熱輻射抑制の観点からは、光源に使用する Si の体積はなるべく小さいことが望ましい。Fig. 2(a) に示す光源においては、高さ500 nm のロッド型フォトニック結晶を採用することで、使用する Si の体積を極力減らしつつ、発電に寄与する

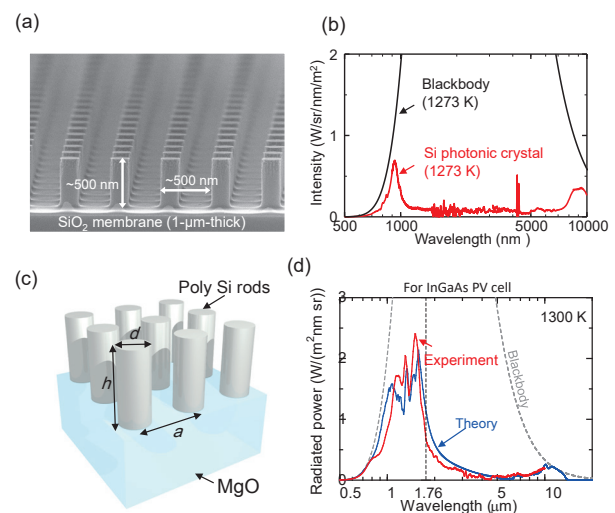


Fig. 2 (a) Scanning microscope image of a Si rod-type photonic-crystal thermal emitter. (b) Measured thermal radiation spectrum of the emitter shown in (a) and the blackbody spectrum at 1273 K. (c) Schematic of a Si rod-type photonic-crystal thermal emitter with a MgO substrate. (d) Measured and calculated thermal radiation spectra of the emitter shown in (c).

可視・近赤外域をフォトニック結晶の共振効果で増強することを狙っている。なお、本光源ではロッド状のSiを支持するため、厚さ1  $\mu\text{m}$ のSiO<sub>2</sub>薄膜を利用している。作製光源を外部ヒーターにより1273 Kに加熱した際に得られた垂直方向の熱輻射スペクトルをFig. 2(b)に示す。波長1  $\mu\text{m}$ 以下の帯域において、同温度の黒体輻射強度に近い熱輻射が得られているのに対し、それより長波長域の熱輻射強度は抑制されており、可視・近赤外域に集中した熱輻射スペクトルが実現していることがわかる。

また、上記の近赤外熱輻射光源のさらなる高出力動作に向けて、Fig. 2(c)に示すように、厚さ65  $\mu\text{m}$ 程度のMgO基板上に多結晶Siからなるロッド型フォトニック結晶を形成した光源の開発も行った<sup>12,13</sup>。MgOは5~20  $\mu\text{m}$ 程度の長波長帯域においてSiO<sub>2</sub>よりも吸収係数が小さい材料であるため、高温に加熱した際に生じる熱輻射損失を抑制しつつ、厚さ1  $\mu\text{m}$ 程度のSiO<sub>2</sub>薄膜を利用した光源よりも機械強度を向上し、さらなる光源の面積化が可能となる。また、本光源設計では、後述する熱光発電システムの実証を見据えて、InGaAs太陽電池のバンドギャップ(1.76  $\mu\text{m}$ )付近にフォトニック結晶の共振ピークが一致するように、ロッドの高さ $h$ ・直径 $d$ や格子定数 $a$ を調整した。作製した光源を1300 Kに加熱した際に垂直方向に得られた熱輻射スペクトルの測定結果(赤線)と対応する計算結果をFig. 2(d)に示す。InGaAs太陽電池のバンドギャップより短波長側に集中した熱輻射スペクトルが得られ、実験結果と計算結果がよく一致していることが確認出来た。

## 2.2 高効率熱光発電の実証

前節で開発した狭帯域熱輻射光源をもとに、熱光発電システムの構築を行った<sup>13</sup>。ここでは、熱輻射光源と組み合わせる太陽電池として、波長1.76  $\mu\text{m}$ 帯にバンドギャップ波長を有する、InGaAs太陽電池を採用した。Fig. 3(a)に構築した熱光発電システムの模式図を示す。また、作製したSi熱輻射光源とInGaAs太陽電池の写真を同図(b)(c)に示す。本システムは、4.8 mm角の熱輻射光源の両面に、2つのInGaAs太陽電池(6.4 mm  $\times$  5.9 mm)を配置して、200~300  $\mu\text{m}$ 程度の距離まで近接させた構成であり、系全体を真空( $3 \times 10^{-2}$  Pa程度)とすることで、熱対流損失を抑制している。また、本発電実験では、光源に投入された入力パワーに対する太陽電池の発電パワーの割合(システム変換効率)を正確に評価することを目的として、同図(b)に示すように、熱輻射光源を直径25  $\mu\text{m}$ の細いワイヤで支持して熱伝導損失を抑制しつつ、電流注入加熱により熱輻射光源の加熱を行った。さらに、熱輻射光源にPt/Pt<sub>0.9</sub>Rh<sub>0.1</sub>からなるS熱電対を取り付けることで、光源温度のリアルタイム測定を可能とした。InGaAs太陽電池[同図(c)]については、裏側を10  $^{\circ}\text{C}$ に保持した銅製のヒートシンクに張り付けることで、放熱を行った。

Fig. 3(d)に、光源の投入パワーに対する光源温度変化の測定結果を示す。最大1.24 Wのエネルギーを投入し

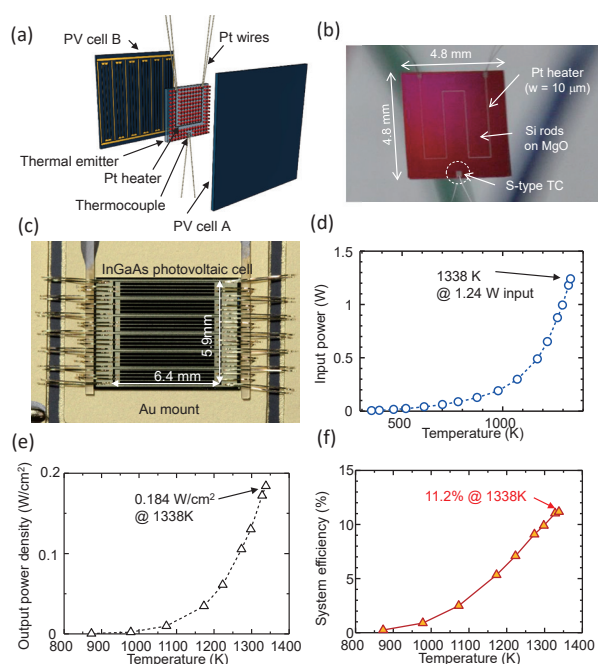


Fig. 3 (a) Schematic of a far-field TPV system composed of a Si rod-type photonic-crystal thermal emitter and two InGaAs PV cells. (b) (c) Images of the fabricated Si emitter and InGaAs cell. (d) Measured emitter temperature as a function of input power. (e) Measured output power density per one PV cell. (f) Measured system efficiency.

たところ、光源温度が1338 Kに到達した。このときに得られた太陽電池1つあたりの発電パワー密度をFig. 3(e)に、システム発電効率をFig. 3(f)に示す。発電パワーは光源温度の上昇に伴い、指数関数的に増大し、光源温度1338 Kにて0.184 W/cm<sup>2</sup>の発電パワー密度が得られた。この値は、通常の太陽光発電の発電パワー密度(0.02 W/cm<sup>2</sup>程度)と比較して1桁程度大きい。また、同図(f)のシステム発電効率は、光源温度1300 K付近で10%を超え、最大で11.2%の効率が得られた。この値は、(システムへの入出力パワーを実測した)先行研究の最高値(6.8%)<sup>2)</sup>を大きく上回る値である。なお今回実証を行ったシステムでは、熱輻射光源からの輻射のうち太陽電池に照射されていない角度成分が存在するため、光源や太陽電池の大きさを拡大して上記の損失を相対的に減少することで、さらなる効率向上が期待される。また、次節で述べる、近接場熱輻射伝達を利用することで、発電パワー密度および発電効率の大幅な増大が可能になると期待される。

## 3. Si熱輻射光源・InGaAs太陽電池一体型近接場熱光発電デバイスの開発

### 3.1 デバイスの設計

本節では、前節で実証した熱光発電システムのさらなる高出力密度化に向けて、熱輻射光源と太陽電池を波長以下の微小距離まで近接させた近接場熱光発電デバイスを実現した成果を紹介する。これまで、近接場熱光発電

システムの実現を目指す試みがいくつか報告されているが、光源と太陽電池を近接させるためにピエゾステージ等の外部駆動系が必要であり、実用化には適さない構成であった<sup>18,19)</sup>。それに対し、本研究では、Fig. 4(a)に模式図を示すように、熱輻射光源と太陽電池を一体化した近接場熱光発電デバイスを開発した<sup>16)</sup>。本デバイスは、厚さ 20  $\mu\text{m}$  の Si 熱輻射光源と厚さ 2.9  $\mu\text{m}$  の薄膜 InGaAs 太陽電池を、厚さ 50  $\mu\text{m}$  の Si 中間基板を介して一体化した構造であり、Si 熱輻射光源と Si 中間基板の間に微小空隙 ( $d$ ) が設けられている。Si 中間基板は、Si 熱輻射光源と同様に高い屈折率 ( $\sim 3.5$ ) を有するため、Si 熱輻射光源の内部で生じた高密度な熱輻射を、近接場光を介して Si 中間基板の内部へと引き出すことが可能である。また、厚さ 50  $\mu\text{m}$  の Si 中間基板は、波長 1.1  $\mu\text{m}$  より長波長側の光に対して透明であるため、中間基板側に引き出された高密度な熱輻射は、そのまま InGaAs 太陽電池まで到達し、そこで光電変換が行われる<sup>14)</sup>。つまり、本デバイス構成では、熱輻射光源と太陽電池を直接近接させた場合と同様に、近接場熱輻射伝達による大幅な光電流の増強が実現可能である。加えて、無添加の Si 中間基板は、太陽電池の構成材料である III-V 族半導体とは異なり、長波長領域においても誘電率の実部が正であり<sup>20)</sup>、表面波モードの生成条件が満たされない。そのため、本構成では、発電効率を低下させる要因となる、表面波モードを介した長波長の熱輻射伝達を抑制することが可能となる<sup>14)</sup>。

なお、本デバイスでは、前節で紹介した Si フォトニック結晶光源とは異なり、熱輻射光源側では十分なスペクトル制御は行っていない。ただし、InGaAs 太陽電池の厚さが数  $\mu\text{m}$  と薄いため、光源から中間基板側に引き出された長波長熱輻射の大部分は、太陽電池のドープ層に

おける自由キャリア吸収を受けることなく、太陽電池の裏面で反射して再び光源側に戻ることが可能である。これにより、実質的に長波長域の熱輻射損失を抑制することが可能であり、発電の高効率化が可能となる。

上記のデバイスについて、光源温度 1200 K を仮定し、光源・中間基板間の空隙長を 100  $\mu\text{m}$  (遠方場) および 150 nm (近接場) とした際の、太陽電池で吸収される熱輻射スペクトルの解析結果を Fig. 4(b) に示す。同図には、1200 K の黒体輻射限界の計算結果を合わせて示す。空隙長を 150 nm まで減少させた場合 (赤線)、遠方場デバイス (青線) と比較して大幅に熱輻射パワーが増加し、InGaAs 太陽電池のバンドギャップ波長以下の帯域で、黒体輻射限界 (黒線) を超える熱輻射の伝達が行われることがわかる。また、空隙長を変えて、InGaAs 太陽電池で生成される光電流密度を計算した結果を同図(c) に示す。空隙長を 200 nm 以下とすることで、同温度の黒体輻射を照射した際の光電流密度 (点線) を超える光電流の生成が可能になることがわかる。

### 3.2 デバイスの作製・評価

デバイス作製では、目標の空隙長に応じて Si 中間基板の表面エッチングを行ったのち、熱輻射光源を形成した別の Si 基板との接合を行うことで、波長以下の微小な空隙長を実現した [Fig. 4(a) 参照]。また、Si 中間基板の裏面側に、InGaAs 太陽電池作製用のエピウエハを接合し、その後電極形成を行った。Fig. 5(a) (b) に作製した Si 熱輻射光源および InGaAs 太陽電池の顕微鏡写真を示す。熱輻射光源および太陽電池の大きさは 1 mm 角とし、Fig. 5(a) に示すように、4 本の幅 10  $\mu\text{m}$  の L 字型の梁で熱輻射光源を支持している。本支持構造を採用することで、梁による熱伝導損失を極力抑制しつつ、熱膨張

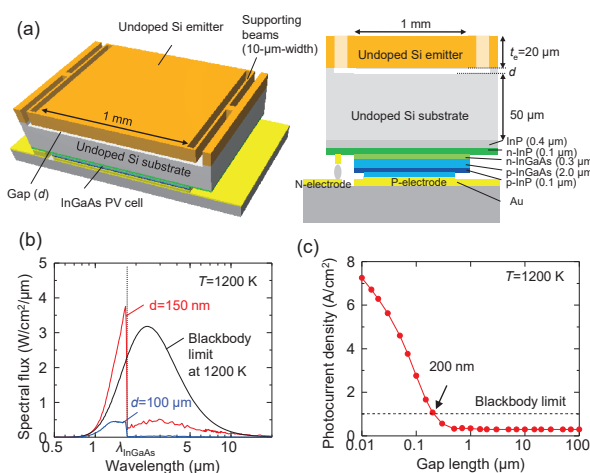


Fig. 4 (a) Bird's eye view and cross section of a one-chip near-field TPV device integrating a Si thermal emitter and an InGaAs PV cell. (b) Calculated thermal radiation transfer spectrum to the InGaAs PV cell for near-field ( $d = 150 \text{ nm}$ ) and far-field ( $d = 100 \mu\text{m}$ ) devices at 1200 K. Black line shows the blackbody spectrum at 1200 K. (c) Calculated photocurrent density of the near-field TPV device as a function of gap length.

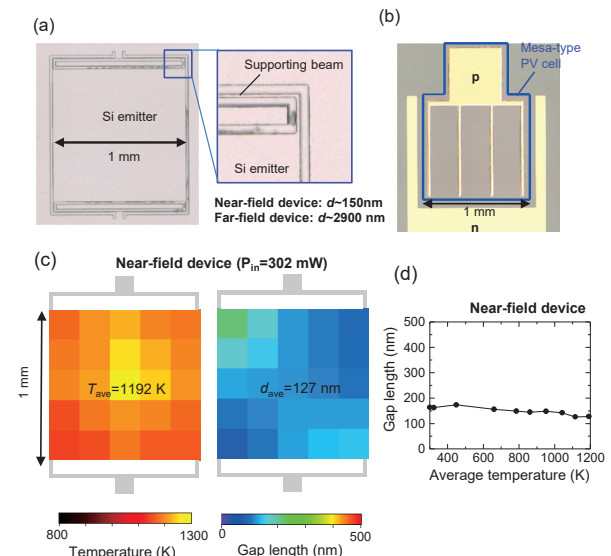


Fig. 5 (a) Microscope image of a fabricated Si emitter. (b) Microscope image of a fabricated InGaAs PV cell. (c) Measured temperature distribution and gap distribution of the near-field TPV device at a heating power of 302 mW. (d) Measured gap length as a function of the emitter temperature.

によって光源内部に発生する応力を水平方向に緩和することで、高温加熱時にも光源・中間基板間の微小な空隙が維持される。なお、今回の実験では、近接場および遠方場デバイスの比較のため、空隙長を約 150 nm および約 2900 nm とした 2 つのデバイスを作製した。

評価においては、真空中で熱輻射光源の中央部にレーザー光を照射して加熱を行うとともに、微弱な白色光を光源面内の 25 点に照射し、その反射スペクトルに現れる Fabry-Perot 干渉(光源の屈折率および光源・中間基板間の空隙長に依存)を測定することで、光源温度分布および空隙長分布をリアルタイムで取得した<sup>15,16)</sup>。例として、近接場デバイスに 302 mW の加熱パワーを投入した際の、光源温度分布および近接距離分布の測定結果を Fig. 5(c) に示す。光源全体を 1140 K 以上に加熱出来ており、平均温度は 1192 K に達した。また、近接距離分布については、平均で 130 nm 以下の近接距離が得られた。Fig. 5(d) に光源温度を変化させた際の平均近接距離の変化を示すが、全ての光源温度に対して 140 nm 程度の平均近接距離が維持出来ていることが確認出来た。

### 3.3 黒体限界を超える光電流生成の実証

前節で作製した遠方場および近接場デバイスについて、光源温度を変化させて太陽電池の電流・電圧特性を測定した結果を Fig. 6(a) (b) に示す。光源温度が等しい条件で比較すると、近接場デバイスにおいて、遠方場デバイスの 5~10 倍の光電流が得られた。なお、近接場デバイスでは、光電流密度が 1 A/cm<sup>2</sup> 程度と通常の太陽光発電と比較して 1~2 桁大きいことに起因して、フィルファクターが減少している。これは、電極構造等の工夫により直列抵抗を低減することで、改善が可能である。両デバイスについて、光源温度を変えながら光電流密度を測定した結果および対応する計算結果を Fig. 6(c) に示す。

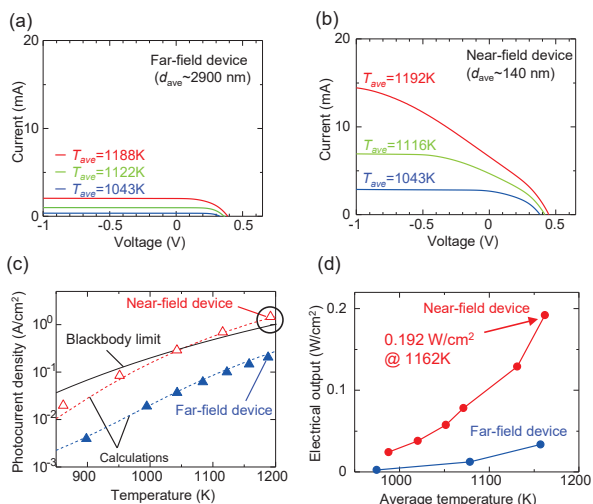


Fig. 6 (a) (b) Measured current-voltage characteristics of far-field and near-field TPV devices. (c) Measured and calculated photocurrent density of far-field and near-field TPV devices. (d) Measured electrical output power density of far-field and near-field devices.

実験結果と計算結果はよく一致しており、近接場熱輻射伝達による光電流増強の効果が確認出来る。さらに、近接場デバイスでは、光源温度 1192 K において、黒体限界(黒線)の 1.5 倍の光電流密度が生成されており、黒体限界を超える光電流密度の生成可能なワンチップデバイスの実証に初めて成功した<sup>16)</sup>。

また、近接場デバイスと遠方場デバイスにおいて、発電パワー密度の温度依存性を比較した結果を Fig. 6(d) に示す。なお、本比較においては、太陽電池の直列抵抗を低減した別の発電デバイスを用いた。光源温度 1162 K において、近接場デバイスで遠方場デバイスの 5 倍以上に相当する発電パワー密度 0.192 W/cm<sup>2</sup> が得られた。Fig. 3(e) に示した遠方場熱光発電の実験では、光源温度 1338 K で同程度の発電パワー密度が得られたことを考慮すると、近接場熱輻射伝達の活用により、約 200 K 低い光源温度でも、高い発電パワー密度が得られることが実証された。

## 4. 今後の展望

本稿では、高出力・高効率な熱光発電への展開を目指して、近赤外 Si 熱輻射制御光源を用いた遠方場での熱光発電の現状とともに、近接場熱輻射伝達の活用による黒体限界を超える光電流生成を実現した成果について、我々の研究を中心に紹介した。今後、熱輻射スペクトルのより完全なスペクトル制御と、近接距離の低減によるさらなる熱輻射増強を実現することで、高出力密度 (>5 W/cm<sup>2</sup>) かつ高効率 (>35%) な熱光発電も実現可能になることが数値計算により示されており<sup>17)</sup>、将来、本技術が、熱エネルギーの有効利用を通して、持続可能な社会の実現に貢献することが期待される。

## 謝 辞

本研究の一部は科研費(17H06125)の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) R. M. Swanson: Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet. **67** (1980) 186.
- 2) D. M. Bierman, A. Lenert, W. R. Chan, B. Bhatia, I. Celanovic, M. Soljacic, and E. N. Wang: Nat. Energy **1** (2016) 16068.
- 3) Z. Omair, G. Scranton, L. M. Pazos-Outon, T. P. Xiao, M. A. Steiner, V. Ganapati, P. F. Peterson, J. Holzrichter, H. Atwter, and E. Yablonovitch: Proc. Nat. Acad. Sci. **116** (2019) 15356.
- 4) D. Fan, T. Burger, S. McSherry, B. Lee, A. Lenert, and S. R. Forrest: Nature **586** (2020) 237.
- 5) A. LaPotin, K. L. Schulte, M. A. Steiner, K. Buznitsky, C. C. Kelsall, D. J. Friedman, E. J. Tervo, R. M. France, M. R. Young, A. Rohskopf, et al.: Nature **604** (2022) 287.
- 6) D. B. Brace: *The Laws of Radiation and Absorption: Memoirs by Prévost, Stewart, Kirchhoff, and Kirchhoff and Bunsen* (American Book Company, 1901).
- 7) J. J. Greffet and M. Nieto-Vesperinas: J. Opt. Soc. Am. A **15** (1998) 2735.
- 8) M. D. Zoysa, T. Asano, K. Mochizuki, A. Oskooi, T. Inoue, and S. Noda: Nat. Photon. **6** (2012) 535.
- 9) T. Inoue, M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda: Opt. Express **24**

- (2016) 15101.
- 10) T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda: *Nat. Mater.* **13** (2014) 928.
- 11) T. Asano, M. Suemitsu, K. Hashimoto, M. De Zoysa, T. Shibahara, T. Tsutsumi, and S. Noda: *Sci. Adv.* **2** (2016) e1600499.
- 12) M. Suemitsu, T. Asano, M. De Zoysa, and S. Noda: *Appl. Phys. Lett.* **112** (2018) 011103.
- 13) M. Suemitsu, T. Asano, T. Inoue, and S. Noda: *ACS Photon.* **7** (2019) 80.
- 14) T. Inoue, K. Watanabe, T. Asano, and S. Noda: *Opt. Express* **26** (2018) A192.
- 15) T. Inoue, T. Koyama, D. D. Kang, K. Ikeda, T. Asano, and S. Noda: *Nano Lett.* **19** (2019) 3948.
- 16) T. Inoue, K. Ikeda, B. Song, T. Suzuki, K. Ishino, T. Asano, and S. Noda: *ACS Photon.* **8** (2021) 2466.
- 17) T. Inoue, T. Suzuki, K. Ikeda, T. Asano, and S. Noda: *Opt. Express* **29** (2021) 11133.
- 18) A. Fiorino, L. Zhu, D. Thompson, R. Mittapally, P. Reddy, and E. Meyhofer; *Nat. Nanotech.* **13** (2018) 806.
- 19) C. Lucchesi, D. Cakiroglu, J.-P. Perez, T. Taliércio, E. Tournie, P.-O. Chapuis, and R. Vaillon: *Nano Lett.* **21** (2021) 4524.
- 20) C. J. Fu and Z. M. Zhang: *Int. J. Heat Mass Transfer* **49** (2006) 1703.