

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
Spectral control of near-field thermal radiation for
highly efficient thermo-photovoltaic power generation

課題番号：17H06125

野田 進 (NODA, SUSUMU)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

一般に、高温物体から自由空間へ取り出される熱輻射は、極めて広帯域なスペクトルを示し、輻射強度の上限が同温度の黒体輻射強度で制限される。本研究では、上記の制限を打破するべく、近接場光を利用して所望の帯域のみで黒体輻射限界を超える熱輻射を引き出す技術を確立し、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する。

研究分野：光工学、光量子科学

キーワード：フォトニック結晶

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、一般的な物体の熱輻射スペクトルは極めて幅広く、かつ輻射強度の上限が同温度の黒体輻射強度で制限されるため、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は低いという課題が存在する。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、かつ上記の黒体輻射限界を超えて伝達させる技術を確立することで、熱輻射を利用した発電（熱光発電）の大幅な高出力化・高効率化をはじめとして、各種熱エネルギーの有効利用に貢献可能になると期待される。

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近接させた際に伝達される高エネルギー密度な熱輻射（近接場熱輻射）のスペクトル制御を行うことにより、所望の帯域のみで黒体輻射限界を超える熱輻射を引き出す技術を確立し、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指した。具体的には、(I) 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、(II) 光源・受光素子対の近接場結合法の確立、(III) 黒体輻射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、の3項目を研究目的に設定し、近接場熱輻射制御の体系的理論構築と実験的実証を行うことを目指した。

3. 研究の方法

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。
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。
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、光源の反射スペクトルの分光測定により行った。

4. これまでの成果

(I) 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

はじめに、フォトニック結晶から生じる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立した。次に、1次元フォトニック結晶 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の解析を行った結果、中間基板およびフォトニック結晶を導入することで、太陽電池の発電に寄与する帯域のみで、黒体限界を超える熱輻射伝達が得られることを明らかとした。さらに、2次元フォトニック結晶のフラットバンドを利用することで、さらに5倍以上の熱輻射スペクトルの狭帯域化が

実現しうることも理論的に見出し、フォトリソニック結晶構造の導入が、近接場熱輻射スペクトルの帯域制御に有用であることを、世界で初めて定量的に示すことに成功した。

(II) 光源・受光素子対の近接場結合法の確立

(I)で設計した近接場熱光発電システムの構築と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、熱輻射光源と太陽電池(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と熱伝導損失を極力抑制出来る Si 熱輻射光源構造と、表面に光源との近接を妨げる突起物がない Si 中間基板上 InGaAs 太陽電池構造の作製手法を確立した。次に、両者を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 1(a)]の作製プロセスを開発した。作製デバイスの近接距離分布を測定したところ、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[図 1(b)]。

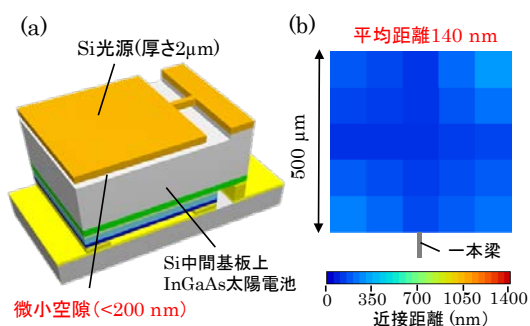


図 1: (a)薄膜 Si 熱輻射光源と太陽電池を一体化した近接場熱輻射デバイス (b)光源温度 1040 K における近接距離分布の測定結果

(III) 黒体輻射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

(II)で開発した光源・太陽電池一体型近接場デバイスについて、平均近接距離が異なる2つのデバイスを作製し、等しい光源温度(1040 K)で太陽電池の電流電圧特性を測定した。その結果、近接距離を 1160 nm から 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した[図 2(a)]。また、短絡電流の温度依存性の測定結果が、項目(I)で確立した解析手法による計算結果とよく一致することを確認し[図 2(b)]、近接場光による近赤外域の熱輻射増強効果の定量的な実証に、世界で初めて成功した。さらに、高出力・高効率な近接場熱光発電を実現する準備として、遠方場における熱光発電実験についても別途検討した結果、投入した熱から電力への変換効率 11.2% (我々の知る限り、世界最高値) が得られた。

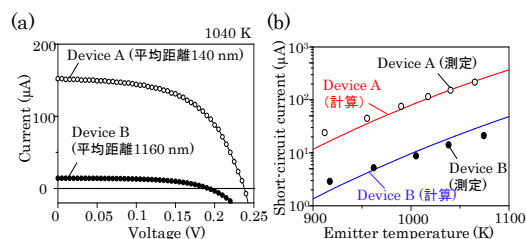


図 2: (a)近接場熱光発電デバイスの電流電圧特性 (b)測定結果および計算結果の比較

5. 今後の計画

今後の研究では、高温加熱時の光源平坦性がさらに向上すると期待される、より厚膜の Si 熱輻射光源を利用して、一体型デバイスの作製を行い、1200 K 以上の高温動作による、超高密度な熱輻射伝達の実現を目指す。また、新たな展開として、熱光発電のさらなる高効率化に向けて、反射鏡を導入したりサイクル式近接場熱光発電システムの実証を目指す。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 発表論文等

1. M. Suemitsu, T. Asano, T. Inoue and S. Noda, "High-efficiency thermophotovoltaic system that employs an emitter based on a silicon rod-type photonic crystal", ACS Photonics, Vol. 7, pp. 80-87 (2020). ※Nature Photonics 誌 2020 年 2 月号 (pp.66) にも記事が掲載
2. T. Inoue, T. Koyama, D. D. Kang, K. Ikeda, T. Asano and S. Noda, "One-chip near-field thermophotovoltaic device integrating a thin-film thermal emitter and photovoltaic cell", Nano Letters, Vol. 19, pp. 3948-3952 (2019).
3. T. Inoue, T. Asano, and S. Noda, "Spectral control of near-field thermal radiation via photonic band engineering of two-dimensional photonic crystal slabs", Optics Express, Vol. 26, pp. 32074-32082 (2018).
4. T. Inoue, K. Watanabe, T. Asano, and S. Noda, "Near-field thermophotovoltaic energy conversion using an intermediate transparent substrate", Optics Express, Vol. 26, pp. A192-A208 (2018).

上記を含め査読付き論文 11 件、招待講演 21 件、一般講演 26 件

受賞等

1. 野田進, 2019 MOC Award, 2019 年 11 月.
2. 末光真大, (浅野卓, 井上卓也, デジイサメーナカ, 野田進), 応用物理学会講演奨励賞, 2019 年 3 月.
3. 井上卓也, 井上研究奨励賞, 2018 年 2 月.
7. ホームページ等

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp>