

TSUBAME 共同利用 令和 2 年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 揺動電磁気シミュレーションを用いた光放射現象に関する研究

英文: A study of light emission phenomena using fluctuational electromagnetic simulation

利用課題責任者

櫻井 篤

所属

新潟大学工学部

<http://www.eng.niigata-u.ac.jp/~rad/index.html>

邦文抄録(300 字程度)

本研究では、半導体発光素子(light emitting diode ; LED)を用いた 熱フォトニクス(Thermophotonics ; TPX)発電システムに注目した。これはエミッタに LED を用いることが特徴である。LED では、電圧を印加して非平衡状態にすることで、プランクの法則による黒体放射とは異なったエレクトロ・ルミネセンスと呼ばれる発光を生じる。そのため、遠方場においても高効率なエネルギー輸送ができる可能性がある。TPX システムは、大きな電力密度を有する発電手法である。また、バイアスのかけ方を工夫することで冷却機としても応用できる。

英文抄録(100 words 程度)

In this study, we focused on a thermophotonics (TPX) power generation system using semiconductor light emitting diodes (LEDs). This is characterized by using LEDs as the emitter. In LEDs, by applying a voltage to bring them into an unbalanced state, light emission called electroluminescence, which is different from blackbody radiation according to Planck's law, is generated. Therefore, there is a possibility that highly efficient energy transportation can be performed even in a distant field. The TPX system is a power generation method with a large power density. It can also be applied as a cooler by devising how to apply bias.

*Keywords:* thermophotonics, light emitting diodes, electroluminescence, power generation

## 背景と目的

現在、世界規模での急速な工業化に伴い、エネルギー消費の増加、化石燃料の枯渇や地球温暖化が大きな問題となっている。更に東日本大震災の発生などにより、脱原子力エネルギーの潮流がある。このような現状から、エネルギー利用の高効率化や自然エネルギーによって生み出される再生可能エネルギーの利用に注目が集まっている。

これらの問題の解決策の一つとして、近接場熱光起電力発電(Near-field Thermophotovoltaic ; NTPV)システムがある。NTPV システムでは、太陽光だけでなく工場の排熱など多様な熱源が利用可能である。発電原理は、太陽光発電と大きな違いはないが、波長選択的エミッタによって PV セルの高感度波長域に整合した熱ふく射光を放射することで高効率な発電ができる。しかし、エミッタと PV セル間の距離をナノメートルスケールで維持する必要があり、電力密度が小さいという

問題点がある。

そこで本研究では、半導体発光素子(light emitting diode ; LED)を用いた 熱フォトニクス(Thermophotonics ; TPX)発電システムに注目した。これは NTPV 発電システムと異なり、エミッタに LED を用いることが特徴である。LED では、電圧を印加して非平衡状態にすることで、プランクの法則による黒体放射とは異なったエレクトロ・ルミネセンス(EL)と呼ばれる発光を生じる。そのため、遠方場においても高効率なエネルギー輸送ができる可能性がある。TPX システムは、大きな電力密度を有する発電手法である。また、バイアスのかけ方を工夫することで冷却機としても応用できる。

## 結果および考察

TPX システムの LED-PV セル間のふく射熱伝達を計算するために、揺動電磁気学シミュレーションを用い

た。一般的な電磁波解析手法では、有限温度を持つ物体から生じる電磁波を表現できない。揺動電磁気学の理論では、物体内部でランダムに熱揺動する格子振動を揺動電流としてマクスウェル方程式の電流密度の項に導入される。従来の電磁波解析手法に揺動電磁気学の理論を組み入れることによって、2 物体間の熱ふく射解析が可能となる。

これまでの TPX に関する研究は、発電、冷却システムのいずれも近接場での運用を想定しているものがほとんどであり、遠方場での運用を想定したシステムの研究・開発は行われていない。TPX システムを遠方場で運用するための最低条件としてシステムの発電量が LED の駆動電力を上回る必要がある。しかし、実際には非放射再結合や表面フォノンポラリトンなどの非理想特性も考慮する必要がある。そこで本研究では遠方場 TPX 発電システムにおける発電特性について数値シミュレーションによって求め、非理想特性を含めた現実的な状態におけるシステムの有効性について調査した。

遠方場 TPX 発電システムでは、LED と PV セルの材料として損失の少ない直接遷移型半導体であるヒ化アルミニウムガリウム ( $\text{Al}_{1.75}\text{Ga}_{0.825}\text{As}$ ) を用いた。LED と PV セルの背面には光の透過を防ぐために完全導体 (PEC) を使用した。基板と LED/PV セルの間にはキャリアを活性層に閉じ込めるための Confinement Layer を堆積させ、材料はバンドギャップが LED と PV セルよりも十分大きくなるように Al の混晶比を決定した  $\text{Al}_{1.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  を用いた。LED-PV セル間のギャップは、近接場 (10 [nm]) と遠方場 (1000 [nm]) の 2 パターンで計算、比較した。

さらに、TPX システムの発電特性を高めるために近接場エクストラクターを導入したシステムを設計した。近接場エクストラクターを PV セルの上部に堆積することによって、本来真空中で距離減衰する近接場光を近接場エクストラクターを介して PV セルに伝搬することができる。また、もう一つの利点として非理想特性である表面フォノンポラリトンの影響を抑えることができる。したがって、TPX 発電システムに近接場エクストラクターを組み入れることで発電特性が向上すると考えられる。

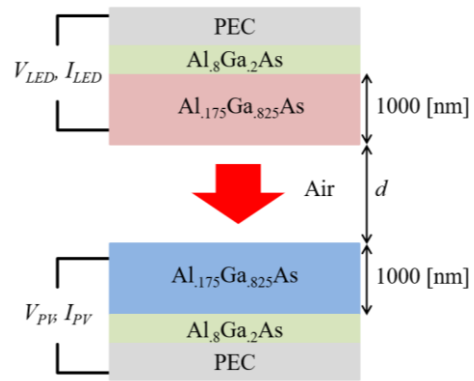


Fig. 1. Schematic of TPX system.

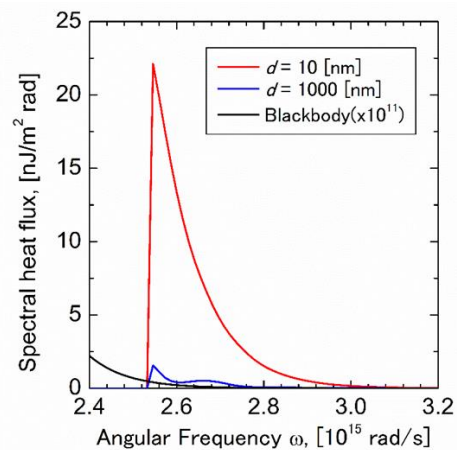


Fig. 2. Spectral heat fluxes with different gaps.

#### まとめ、今後の課題

TPX 発電システムモデルの揺動電磁気学シミュレーションによって得られた結果から、以下の知見が得られた。

- LED-PV セル間が遠方場である場合においてもプランクの法則による黒体放射を上回るエネルギー伝達が可能であることを示した。
- LED ではキャリア注入によって非平衡状態を作ることによってフォトンエネルギーが増加し、発光強度が増加していることを示した。
- 遠方場 TPX 発電システムが非放射再結合を考慮した場合においても、動作可能であることを示した。
- 近接場エクストラクターによって本来ナノメートルで消失する近接場光を遠方に伝達できることが分かった。

今後は、より現実的な発光・消失過程を再現し、実証実験に向けて検討を行う予定である。