

TSUBAME 共同利用 令和3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)を用いた熱フォトンクス(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)を用いた熱フォトンクス(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、TPX 発電システムの LED と PV セルに用いる半導体材料として、2 層グラフェン (bilayer graphene; BLG) を用いる。BLG はゲート電圧と構造に応じてバンドギャップが変化する材料であり、比較的低いバンドギャップを取るためバンドギャップ波長が赤外となりやすい。通常、グラフェンは価電子帯と伝導帯がディラック点 1 点で交わる特異なバンド構造を持つため、バンドギャップを形成せず発光素子としては利用できない。しかし、グラフェンが 2 層重なった BLG の場合においては、垂直方向のゲート電圧を印加することによって 2 層間の原子の反転対称性が崩れ、バンドギャップが形成されるため発光素子として利用することができる。

計算モデルの概略図を Fig.1 に示す。この構造で解析を行った結果が Fig.2,3 である。Fig.2 より近接場領域では単層グラフェンデバイス、2 層グラフェンデバイス共に黒体放射限界を大きく上回るエネルギー伝達が起きているのが確認できる。一方で、Fig.3 によると遠方場領域では単層グラフェンデバイスでは黒体放射下回るが、2 層グラフェンデバイスではバンドギャップ波長付近で黒体放射限界以上のエネルギー伝達が達成できている。

まとめ、今後の課題

本研究では、揺動電磁気学シミュレーションを用い

て TPX 発電システムのエネルギー輸送メカニズムについて検討した。今後は異なる半導体材料の活用も視野に入れて新たな光と物質の相互作用に起因するエネルギー輸送メカニズムの解明を目指す。

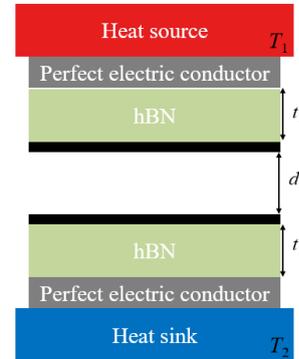


Fig. 1 Schematic of the TPX system.

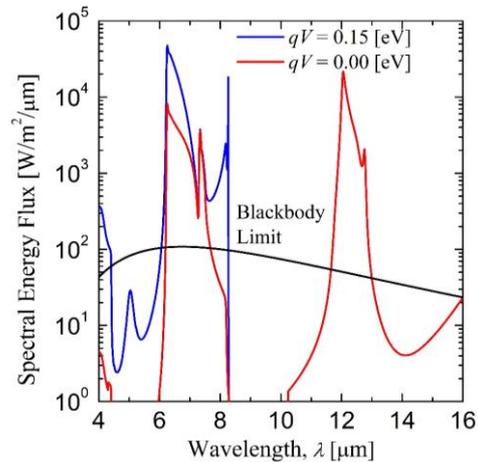


Fig. 2 Spectral Energy flux between the emitter and the PV cell at  $d = 0.1$  [ $\mu\text{m}$ ].

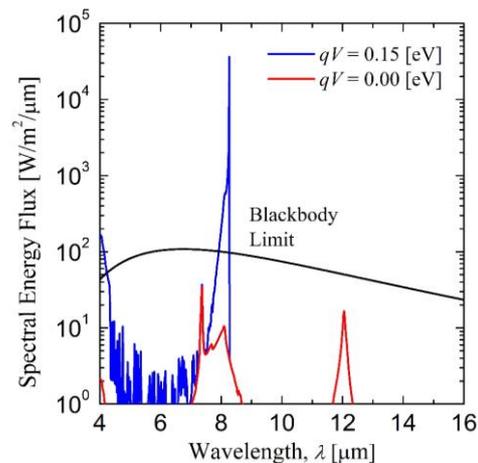


Fig. 3 Spectral Energy flux between the emitter and the PV cell at  $d = 20$  [ $\mu\text{m}$ ].