

博士論文の要旨及び審査結果の要旨	
氏名	松野 優樹
学位	博士 (工学)
学位記番号	新大院博 (工) 第 532 号
学位授与の日付	令和 4 年 9 月 20 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	A study of thermal photonics for effective energy utilization (エネルギー有効利用のためのサーマルフォトニクスに関する研究)
論文審査委員	主査 准教授・櫻井 篤 副査 教授・松原 幸治 副査 教授・安部 隆
<p>博士論文の要旨</p> <p>本論文では、エネルギー有効利用のためのサーマルフォトニクス技術についての研究成果を報告する。ここでサーマルフォトニクスとは、熱工学と光工学の融合研究分野を指す。具体的には、太陽熱起電力発電 (STPV)、スカイラジエーター、サーモフォトニクス (TPX) の 3 つの技術に焦点を当て、その可能性について議論した。</p> <p>従来方法である太陽光の下に太陽電池を設置するだけの方法では、高い発電効率を得ることは困難である。これは、太陽光の照射強度の高い波長域と太陽電池の内部量子効率 (IQE) の高い波長域との不一致に起因している。STPV では、太陽電池の高照度波長域で高吸収率を持つ吸収材と太陽電池の高 IQE 波長域で高放射率を持つ放射材を適用することで、太陽光からより効率的に電力を生成することが可能となる。第 3 章および第 4 章にて、STPV システム用の Metal-Insulator-Metal (MIM) 構造メタサーフェス吸収材および放射材を提案、性能を議論した。第 3 章では、タングステンと SiO₂ をベースとした MIM 構造メタサーフェス太陽光吸収材の設計と考察を行い、提案した構造が可視-近赤外領域において高い吸収率と優れた波長選択性を有していることを示した。第 4 章では、タングステンおよび SiO₂ を用いた MIM 構造メタサーフェス放射材を提案、作製した。設計したメタサーフェス放射材は、太陽電池の高 IQE 波長領域で高い放射ピークを持つことを示した。メタサーフェスはフォトリソグラフィ法を用いて作製され、製作したメタサーフェスが可視光から近赤外光領域で高い放射率と優れた波長選択性を示し、その放射率は FDTD シミュレーションと非常によく一致していた。また、FDTD シミュレーションを用いることにより、その電磁波共鳴のメカニズムを明らかにした。</p> <p>第 5 章では、スカイラジエーター用途の MIM 構造メタサーフェスを提案、製作し、メカニズムに関して考察を行った。スカイラジエーターは、建築物の壁面に適用可能な次世代の省エネルギー材料である。大気窓の波長域に調整された熱を放射することで、不要な熱を大気圏外に放出することを可能とする。本論文では、Al-CeO₂ を用いた MIM メタサーフェス放射/吸収材を設計し作製した。設計されたメタサーフェスは、大気窓の範囲の 9.8 μm 付近で 100% に近い放射率を示した。さらに、ウェットエッチング法を適用することで、検討したメタサーフェスの実用レベルでの大面積加工が可能であることを示した。</p>	

第6章では、黒リン (BP) を用いた中赤外領域における非平衡放射材の検討と、そのふく射輸送メカニズム、及び近接場から遠方場までの低熱エネルギー回収に向けた TPX システムとしての可能性を検討した。低温なエネルギー源 (500K 以下) からの排熱は産業活動による廃熱のうちの大部分を占めているが、そのエネルギー抽出は技術的に困難であり、ほとんどは再利用されることなく放出されている。低温なエネルギーの回収を目指した発電方法として、TPX 発電が注目されている。本研究では工業性に優れ、かつ特異な光学特性を有することから注目されている BP に着目し、その TPX 応用に向けた検討を行った。化学ポテンシャルを印加することにより、BP 放射材からのエネルギーフラックスは大幅に上昇し、BP のバンドギャップより短い波長域で遠方場であっても黒体放射限界を超えることを示した。また、放射伝達のメカニズムを、揺動電磁気学シミュレーションを適用することで明らかにし、BP 吸収材と放射材の化学ポテンシャルを変化せることで、近接場と遠方場の両条件で BP を用いた TPX システムが正の電力と効率を発生することを示した。

本研究は、サーマルフォトンが効率的なエネルギー利用のための有望な手段の一つであることを示すことを目的とし、サーマルフォトン応用の基礎研究を行った。これらの研究はエネルギーの有効活用という社会課題の解決、並びに、サーマルフォトン技術の更なる発展に役立つものと考えられる。

審査結果の要旨

本研究は、サーマルフォトンが効率的なエネルギー利用のための有望な手段の一つであることを示すことを目的とし、サーマルフォトン応用の基礎研究を行った。第1章の序論において、熱ふく射の分野に対する本研究の立場と目的を明確にした。第2章の計算手法において、本研究で用いた計算手法である FDTD 法による電磁波解析、揺動電磁気学による熱伝達計算について具体的に記述した。第3章及び第4章において STPV システム用の MIM 構造メタサーフェス吸収材および放射材を提案、性能を議論した。第3章では、タングステンと SiO_2 をベースとした MIM 構造メタサーフェス太陽光吸収材の設計と考察を行い、提案した構造が可視-近赤外領域において高い吸収率と優れた波長選択性を有していることを示した。第4章では、タングステンおよび SiO_2 を用いた MIM 構造メタサーフェス放射材を提案、作製した。設計したメタサーフェス放射材が、太陽電池の高 IQE 波長領域で高い放射ピークを持つことを示した。また、FDTD を用いた電磁波解析により放射増強が Magnetic Polariton や Surface Plasmon Polariton、Cavity Mode によって引き起こされていることを示した。第5章では、スカイラジエーター利用を想定した Al-CeO₂ を用いた MIM メタサーフェス放射/吸収材を設計し作製した。設計されたメタサーフェスは、大気窓の範囲の 9.8 μm 付近で 100%に近い放射率を示した。また、ウェットエッチング法を適用することで、検討したメタサーフェスの実用レベルでの大面積加工が可能であることを示した。さらに、FDTD を用いた電磁波解析により放射増強が Magnetic Polariton によって引き起こされていることを示した。第6章では、BP を用いた中赤外領域における非平衡放射材の検討と、そのふく射輸送メカニズム、及び近接場から遠方場までの低熱エネルギー回収に向けた TPX システムとしての可能性を検討した。化学ポテンシャルを印加することにより、BP 放射材からのエネルギーフラックスは大幅に上昇し、BP のバンドギャップより短い波長域で遠方場であっても黒体放射限界を超えることを示した。また、放射伝達の増強が Evanescent wave coupling と Fabry-Perot 共鳴によるものである事を、揺動電磁気学シミュレーションを適用することで明らかにした。さらに BP 吸収材と放射材の化学ポテンシャルを変化せることで、近接場と遠方場の両条件で BP を用いた TPX システムが正の電力と効率を発生することを示した。

以上より、本論文は熱工学の分野において革新的な技術の開発に貢献した。また、この研究過程や研究結果は博士論文としてふさわしいものである。よって、本論文は博士 (工学) の博士論文として十分であると認定した。