

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 矢田 恭平  
学位 博士 (工学)  
学位記番号 新大院博 (工) 第 512 号  
学位授与の日付 令和 3 年 3 月 23 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 メタサーフェスを用いた熱ふく射制御に関する研究

論文審査委員 主査 教授・松原 幸治  
副査 教授・安部 隆  
副査 教授・平元 和彦  
副査 准教授・櫻井 篤

博士論文の要旨

すべての物体は、その内部エネルギーに応じて自発的かつ連続的に光子を放出しており、これを熱ふく射と呼ぶ。熱ふく射により放出されるエネルギーは温度によって異なり、温度が高ければ高いほどそのエネルギーは大きくなる。私たちの身の回りには、太陽などの自然の熱源や工業排熱などの人工の熱源が無数に存在する。そのため、さまざまな熱源を利用するための研究は非常に重要である。

熱ふく射の分光特性は物体の材料や形状に依存しており、その熱ふく射を制御するための方法の 1 つとして、メタサーフェスと呼ばれる材料が注目を集めている。メタサーフェスとは、メタ原子と呼ばれる金属・誘電体ナノ構造で構成された部品を、材料表面に実装したメタマテリアルの一種である。このメタサーフェスを用いることによる、熱光起電力システム、赤外線ヒーター、放射冷却デバイス、バイオセンシング、マイクロボロメーター、イメージング、光通信などといった幅広い分野への熱ふく射の応用が期待されている。そこで本博士論文では、新たな視点から熱ふく射の学問を切り拓き、先進的な熱ふく射制御技術の基礎研究を行うことを目的としている。

第 3 章では、スリット型グラフェンメタサーフェスによるアクティブ熱ふく射制御について述べた。本章では、金属、誘電体およびグラフェンからなるスリット型グラフェンメタサーフェスを提案した。提案した構造について厳密結合波解析 (RCWA) 法を用いて解析したところ、グラフェンのフェルミエネルギーを変化させることにより放射のピーク波長がシフトした。また、この放射ピークは誘電体層における Fabry-Perot 共鳴とスリットにおける Magnetic Resonance によるものであることを示した。さらに、提案した構造における放射率のピーク波長は、等価回路モデルを用いることにより予測することができた。

第 4 章では、グラフェンリボン型メタサーフェスによるアクティブ熱ふく射制御について述べた。本章では、金属、誘電体およびグラフェンリボンからなるグラフェンリボン型メタサーフェスを提案した。RCWA 法を用いて解析したところ、任意の目的波長においてアクティブオン/オフスイッチング可能な放射ピークが出現した。この放射ピークは、グラフェンプラズモンにより Fabry-Perot 共鳴が引き起こされるために生じたと考えられる。

第 5 章では、機械学習を用いた超狭帯域熱放射多層膜の開発について述べた。本章では、機械学習に着目し、超狭帯域熱放射多層膜の設計および実証を行った。ベイズ最適化に基づいた機械学習を用いて、任意の目的波長において超狭帯域熱放射を示す非周期的な多層

膜構造を効率よく設計することができた。また、この放射ピークのメカニズムがフォトニック結晶における局在モードによるものだと示した。さらに、設計した構造を実際に作製してフーリエ変換赤外分光光度計で測定したところ、ピーク波長こそ僅かにずれるが、目的波長付近で高い Q 値を示す構造を作製することができた。

第 6 章では、スーパーランキアン熱ふく射デバイスの開発について述べた。本章では、低温排熱用 TPV システムに対するスーパーランキアンデバイスの開発を行うことを目的とし、 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$  とグラフェンを組み合わせた構造を提案した。揺動電磁気学と RCWA 法を組み合わせることで解析を行ったところ、近接場領域において黒体放射を超える熱流束が得られた。また、グラフェンを用いることにより、近接場領域における熱流束を増強できることを示した。これはグラフェンプラズモンにより近接場放射が増強されたためであると考えられる。

本論文では、新たな視点から熱ふく射の学問を切り拓くことを目的とし、先進的な熱ふく射制御技術の基礎研究を行った。これらの研究は、熱ふく射制御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

本論文は、新たな視点から熱ふく射の学問を切り拓き、先進的な熱ふく射制御技術の基礎研究を行うことを目的として研究を行った。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厳密結合波解析法、揺動電磁気学による熱伝達計算、ベイズ最適化を用いた機械学習について具体的に記述した。第 3 章および第 4 章において、一般的なメタサーフェスでは得ることができないアクティブ制御をグラフェンメタサーフェスにより達成した。第 3 章において提案したスリット型グラフェンメタサーフェスでは、グラフェンのフェルミエネルギーを制御することによって放射のピーク波長シフトを達成できることを示した。また、放射の増強が Fabry-Perot 共鳴および Magnetic Resonance によるものであることを示し、等価回路モデルによってピーク波長の予測が可能であることを示した。第 4 章において提案したグラフェンリボン型メタサーフェスでは、グラフェンのフェルミエネルギーを制御することによって放射のオン/オフスイッチングを達成できることを示した。また、等価回路モデルによって任意の波長における狭帯域放射が得られることを示した。さらに、放射の増強がグラフェンプラズモンの励起による Fabry-Perot 共鳴によるものであることを示した。第 5 章において、熱ふく射の分野に機械学習を導入し、機械学習による熱ふく射デバイスの開発を実証した。機械学習により多層膜の構造を最適化することにより、任意の波長における超狭帯域放射が達成できることを示した。また、放射の増強がフォトニック結晶における局在モードによるものであることを示した。さらに、実証実験により、目的の波長付近に超狭帯域放射が達成できることを示した。第 6 章において、一般的な熱ふく射輸送における限界である黒体放射を超えるエネルギーを伝達できるデバイスを開発した。また、グラフェンを用いることにより、それをさらに増強できると示した。さらに、この増強はグラフェンプラズモンによるものであることを示した。

以上より、本論文は熱ふく射の学問分野において新たな学術的価値を創出することに貢献したと考えられ、この研究成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。