

| | | | |
|--|------------------------|----|---------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 末 光 真 大 |
| 論文題目 | 狭帯域熱輻射光源による熱光発電システムの構築 | | |
| (論文内容の要旨) | | | |
| <p>本論文は、電子-光子の両状態の制御によって 1300 K 程度の高温で可視-近赤外で狭帯域な発光を示す熱輻射光源を実現し、同光源を用いた熱光発電システムを構築し世界最高効率を得た成果をまとめたものであり、6 章から構成される。</p> <p>熱光発電とは物体の熱輻射を光電変換素子で電力に変換する発電システムのことである。本発電技術は光電変換素子の電力変換効率が高い可視-近赤外域で選択発光する光源を用いると極めて高効率となるため、本研究ではまず熱輻射光源の開発をおこなった。その中でまず、Si のバンド間遷移による光吸収とロッド型フォトニック結晶による光共振モードを併用した狭帯域熱輻射光源構造の設計をおこなった。次に、原理実証として SOI 基板を加工して設計構造を作製し、1300 K 程度の高温で可視-近赤外域で狭帯域発光する熱輻射光源の実証に成功した。原理検証のために作製した光源は Si ロッド構造の足場が SiO₂ であり、SiO₂ 由来の不要な赤外輻射を抑制するために厚みを 1 μm 以下にする必要があった。熱光発電の実用のためには光源を大面積に作製することが求められるので機械強度の高い光源開発を行った。そのために SiO₂ よりも不要な赤外輻射が小さい酸化マグネシウム(MgO)基板上に Si ロッド型フォトニック結晶構造を作製することをおこない、50 μm 程度の厚みの基板上で狭帯域な熱輻射を得ることに成功した。続いて本光源の加熱方法の開発をおこない、加熱時の熱の散逸を最小限に留めつつ投入エネルギーと光源温度を正確に測定しながら加熱できる光源の開発に成功した。それに併せ、光電変換素子の開発も行い、光源の熱輻射を高い効率で電力に変換できる素子の開発に成功した。開発した熱輻射光源と光電変換素子をあわせて熱光発電システムを構築した結果、光源温度が 1338 K の時に入力エネルギーに対する電力変換効率が 11.2% となり、世界最高効率の 6.8% を 1.65 倍上回る結果を得ることに成功した。構築した熱光発電システムにはシステム構成に由来するエネルギー損失(伝導伝熱、端面輻射等)が含まれており、スケールアップによってこれらの損失を取り除くと 14.5% まで効率が向上することを明らかにした。</p> <p>第 1 章は序論である。まず研究背景として、熱エネルギーの電力変換効率を向上させることが持続可能社会を実現するうえで意義が高いことが説明されており、この変換効率を高められる発電方式の一つに熱光発電があることが述べられている。次に、熱光発電システムの構成を説明したうえでシステムの構成要素の熱輻射光源の熱輻射制御性が発電効率に大きな影響を与えることが説明されている。その後、先行研究の熱輻射制御の実施例と課題を概観した上で、半導体を用いた電子状態の制御とフォトニック結晶を用いた光子状態の制御を併用すると可視-近赤外域で狭帯域発光する熱輻射光源が実現できることが示唆されている。</p> <p>第 2 章ではまず、熱光発電の発電性能の理論計算モデルが説明されている。次に、エネルギー損失の内訳が解説されており、熱輻射制御がなされていない場合の損失の主要因が透過損失(光電変換素子のバンドギャップ波長より長波の熱輻射が素子を透過して失われるエネルギー損失)であり、このバンドギャップ波長より長波の熱輻射をカットオ</p> | | | |

| | | | |
|---|---------|----|---------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 末 光 真 大 |
| <p>フした光源が高効率な発電システムの実現のために必要であることが述べられている。続いて、熱放射光源の発電効率と出力密度のそれぞれが光源の熱放射の制御波長と光源温度によってどのように変化するかが説明されている。その後、光源材料の選定を行い熱光発電の光源の上限温度が示されている。最後に、この上限温度の制約の中で高い効率および大きな出力密度を得るための熱放射光源の設計指針(熱放射の制御波長と光源温度)が示されている。</p> <p>第3章では、狭帯域熱放射光源の具体的な設計と、設計した光源を作製し熱放射スペクトルを評価した結果が述べられている。はじめに熱放射制御の基本原理の説明がなされ、そのあと電子-光子の両状態制御による熱放射制御手法の説明がされている。その後、電子状態の制御の観点でシリコンの吸収係数の温度依存性の理論解析を行い、具体的なフォトニック結晶構造を設計した結果が述べられている。最後に、設計した光源の作製方法の詳細が説明されており、放射率の評価をおこなった結果が示されている。評価の結果、可視-近赤外域で狭帯域発光し、併せて設計と良好に一致した熱放射スペクトルが得られることが明示されている。</p> <p>第4章では、大面積に作製できる狭帯域熱放射光源構造を開発した結果が説明されている。なお、第3章で形成したフォトニック結晶構造はSiロッド構造の足場基板がSiO₂となっており、SiO₂由来の不要な赤外放射を抑制するために厚みを1 μm以下にする必要がある。このように、SiO₂を足場基板として用いる場合、機械強度が小さいという問題があった。熱光発電の実用のためには光源を大面積に作製することが求められるので、本章では機械強度が保てる厚みでも赤外域の熱放射が小さな基板上にフォトニック結晶構造を作製する取り組みが検討されている。この中でSiO₂よりも赤外域の熱放射が小さなMgO基板上にSiロッド型フォトニック結晶構造を作製し、熱光発電に必要な機械強度が得られる50 μm程度の厚みの基板上で狭帯域な熱放射が得られることが実証されている。</p> <p>第5章では、開発した熱放射光源を用いて熱光発電の実証試験をおこなった結果が説明されている。章のはじめに、設計した熱光発電システムの構成が説明されている。次に、熱放射光源の特性に合った光電変換素子を開発した結果が述べられている。素子の設計は、直列抵抗を小さくし、バンドギャップ波長より長波の反射率を高めたものであり、設計通りの素子の作製に成功した結果が述べられている。続いて、熱放射光源の加熱方法や温度測定方法についての説明がなされている。加熱にはジュール加熱方式が採用されており、温度測定には熱電対を用いることが提案され、具体的な作製方法が説明されている。作製した光電変換素子と熱放射光源とを対向させ、熱光発電システムを構築し、発電実証をおこなった結果、入力エネルギーに対する電力変換効率が11.2%となり、これまでの世界最高効率の6.8%を1.65倍上回る結果を得ることに成功した結果が示されている。さらに、発電システムの熱散逸を入力エネルギーから差し引いた際の変換効率は14.5%となり、この結果もこれまでの世界最高効率を超える値であることが示されている。更に、光電変換素子の反射率の改良によってスケールアップした際の効率が最終的に30.4%まで向上することが述べられている。</p> <p>第6章では、本論文において得られた成果が要約されるとともに、今後の展望について述べられている。</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電子-光子の両状態の制御によって 1300 K 程度の高温で可視-近赤外で狭帯域な発光を示す熱輻射光源を実現し、同光源を用いた熱光発電システムを構築して世界最高効率を実現したものである。従来の熱輻射光源は高融点金属を用いたものであり、高温で金属自由電子に由来する長波の熱輻射を抑制できないという問題を抱えていた。それに対し本論文では、熱輻射強度が物質内の電子と光の相互作用に依存して決定されることに着目し、半導体のバンド間遷移を用いた電子状態の制御とフォトニック結晶を用いた光子状態の制御を併用して、上記相互作用の帯域制御を行うことによって、可視-近赤外域で狭帯域に発光する熱輻射光源を世界に先駆けて開発している。本論文に示されている主な成果は以下のようにまとめられる。

1. 可視-近赤外域で狭帯域発光する熱輻射光源を実現するための光源設計をシリコンの吸収係数の温度依存性や厳密結合波理論などを活用して定量的に示した。また、シリコンのバンド間遷移による電子系の制御と正方格子ロッド型フォトニック結晶による光子系の制御を組み合わせた光源構造を設計した。シリコンロッド型フォトニック結晶構造が厚み 1 μm の SiO_2 薄膜上に形成された構造を作製し、1300 K において可視-近赤外域で狭帯域に発光する熱輻射スペクトルを実測した。
2. 開発した可視-近赤外域狭帯域熱輻射光源を熱光発電システムに実装するために光源の機械強度を高める開発をおこなった。赤外域での輻射率が小さい酸化マグネシウム上にシリコンロッド型フォトニック結晶構造を形成した光源を作製し、大面積で狭帯域発光する熱輻射光源を実現した。
3. 開発した熱輻射光源を用いた熱光発電システムの構築をおこなった。このために、直列抵抗が小さくバンドギャップ波長より長波の反射率が高められる光電変換素子の開発をおこなった。また、熱輻射光源の温度と入力エネルギーを定量的に測定しながら加熱するための手法を確立した。開発した光電変換素子と熱輻射光源を対向させて発電実証をおこなった結果、世界最高の発電効率を得ることに成功した。

以上のように、本研究で開発したシリコンロッド型フォトニック結晶は従来の熱輻射光源が抱えていた広帯域発光という課題を克服するものであり、熱光発電の研究分野の進展に貢献すると位置づけられる。さらに、本論文は、熱光発電の発電実証において世界最高の発電効率を得ることに成功しており、熱光発電のベンチマークとなった点も評価できる。このように、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年 8 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。