

京都大学	博士 (工学)	氏名	井上卓也
論文題目	電子・光子両状態制御に基づく高効率・高速熱輻射光源の開発		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、半導体量子井戸による電子状態の制御とフォトニック結晶スラブによる光子状態の制御を併用して熱輻射制御を行うことにより、所望の帯域で高効率に発光し、印加電圧による輻射強度の高速変調が可能な、高効率・高速熱輻射光源を開発した成果をまとめたものであって、7章から構成される。</p> <p>一般的な熱輻射光源は、プランクの輻射則で表される広帯域な発光スペクトルを示し、その輻射強度は光源温度のみで決定されるため、変調速度が極めて遅いという課題を抱える。それに対し、光と物質の相互作用長が有限である系においては、熱輻射強度はその相互作用の大きさにも依存して決定され、定量的には、物体の光の吸収率に比例した熱輻射強度が得られる。本論文では、上記の光と物質の相互作用の有限性に着目し、電子状態と光子状態の両方に制御を加えて吸収率の帯域制御・動的制御を行うことで、熱輻射の自在な制御を実現した結果が述べられている。具体的には、量子井戸におけるサブバンド間遷移の狭帯域な光吸収作用と、フォトニック結晶スラブの大面積共振作用を適切に調整することで、従来光源と比較して、熱輻射スペクトルの100倍以上の狭帯域化や10倍以上のエネルギー利用効率を達成している。また、印加電圧による電子密度の制御により、熱輻射強度や熱輻射波長の高速制御(~MHz)が世界で初めて実証されている。以上の結果は、「低効率・低速応答」という従来の熱輻射光源の常識を覆し、熱輻射光源の応用分野を大きく拡張するものである。</p> <p>第1章は序論である。まず研究背景として、先行研究の熱輻射制御の実施例と課題を概観した上で、半導体量子井戸を用いた電子状態の制御とフォトニック結晶スラブを用いた光子状態の制御を併用し、さらに量子井戸の電子密度の電圧制御を行うことにより、熱輻射光源の狭帯域化および高速制御が実現できることが提案されている。</p> <p>第2章では、半導体量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトニック結晶スラブの光共振モードを併用した熱輻射制御の基本原則が説明され、目的の波長で所望の線幅の熱輻射スペクトルを得るための光源の設計指針が定量的に示されている。具体的には、サブバンド間遷移の遷移周波数とフォトニック結晶スラブのΓ点共振モードの共振周波数を一致させることで、面垂直方向に狭帯域な熱輻射が得られることが指摘されている。さらに、モード結合理論を用いた熱輻射スペクトルの定量的な解析を行うことにより、狭線幅かつ高放射率な熱輻射(吸収率)スペクトルを実現する条件として、①共振モードの光吸収損失と光放射損失の低減、②共振モードの光吸収損失と光放射損失の整合、③共振モードの光放射レートの上下比の最大化(光源構造への上下非対称性の導入)の3点が重要であることが明らかにされている。</p> <p>第3章では、中赤外センシング等への応用を見据えた、単峰かつ狭帯域な熱輻射スペクトルを示す光源の開発が行われている。検討した光源は、GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}Asからなる多重量子井戸層に、正方格子ロッド型フォトニック結晶を導入した構造である。本章の前半では、上記の光源構造の特性に関する数値計算が行われ、本光源の特長として、①サブバンド間遷移の光吸収帯域内に単一のΓ点共振モードが存在するため、</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	井上 卓也
<p>単峰な熱輻射が得られること、②単位格子内に配置された 2 種類のロッドの半径と高さの最適化により、第 2 章で述べた狭帯域・高放射率スペクトルを実現するための 3 条件が成立可能であること、の 2 点が指摘されている。本章の後半では、本構造の作製手法と、フーリエ赤外分光器による熱輻射スペクトルの評価結果が示されており、波長 9.6 μm 付近において、ほぼ単峰で、Q 値 99 かつ放射率 0.70 という狭帯域・高放射率な熱輻射ピークが実証されている。</p> <p>第 4 章では、第 3 章で開発された単峰・高 Q 値熱輻射光源に、電流注入加熱を可能とする電極・電線を導入し、少ない投入電力で所望の波長帯域のみに高効率に発光する熱輻射光源の開発を行った結果が示されている。投入電力に対するフォトニック結晶スラブの輻射パワーの割合を増大するためには、電線による熱伝導損失や、スラブの支持基板・電極等から生じる不要な熱輻射損失を十分に抑制することが重要であることを指摘した上で、適切な電極・電線材料についての議論や、体積の小さな支持基板の作製手法の確立が行われている。開発した電流注入加熱型狭帯域熱輻射光源と、同面積の発光部を有する参照用黒体光源について、同電力(2.3 mW)を投入した際に得られる熱輻射スペクトルを比較した結果、開発光源の光源温度が著しく上昇し、目標波数において黒体輻射光源の 12.6 倍の輻射強度が得られることが実証されている。</p> <p>第 5 章では、物体の熱輻射強度が、物体の温度のみならず物体の吸収率に依存して決定されることに着目し、吸収率の高速制御を通して熱輻射強度の高速変調動作を実現した結果が示されている。具体的には、多重量子井戸層を pn ダイオード構造の内部に導入した構造を採用し、電圧の印加により量子井戸内部の自由電子密度を変化させることで、熱輻射強度を制御することが提案されている。設計光源の作製および評価を行った結果、狭帯域(Q 値 72)かつ高放射率(0.74)な熱輻射ピークの発光強度が、電圧印加により大幅に変化することが実証されている。また、作製光源の変調速度が 600 kHz に達することが明らかとなり、光源の加熱と冷却を繰り返して強度変調を行う従来光源と比較して、約 4 桁高速な熱輻射制御が実現したことが述べられている。</p> <p>第 6 章では、前章で開発した電圧変調型熱輻射光源を利用して、単なる熱輻射強度の変調にとどまらず、熱輻射スペクトルの発光線幅や発光波長の自在な制御を実現している。発光線幅の制御では、発光線幅がサブバンド間遷移の光吸収損失に依存して変化する性質に着目しており、電圧印加によりサブバンド間遷移の光吸収係数を変化させることで、熱輻射スペクトルの Q 値の外部制御と、吸収と放射の Q 値整合による放射率の最大化を実証している。発光波長の制御では、格子定数の異なる複数のフォトニック結晶を同一チップ上に集積化した複数波長切替式熱輻射光源を開発し、印加電圧による熱輻射波長の高速切替動作の実証と、それを利用した非分散型赤外センシングの原理実証実験を行っている。</p> <p>第 7 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、半導体量子井戸による電子状態の制御とフォトニック結晶スラブによる光子状態の制御を併用することにより、熱輻射光源の高効率化および高速制御を実現したものである。従来の熱輻射光源は、プランクの輻射則に従う広帯域な発光スペクトルを示し、輻射強度が光源温度のみで決定されるために応答速度が極めて遅いという課題を抱えていた。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、量子井戸のサブ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スラブ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と高速制御を行うことで、所望の単一波長に熱輻射が集約された高効率光源や、熱輻射強度・波長の電圧変調が可能な高速応答型光源を、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. 目標の単一波長で狭線幅・高強度な熱輻射を実現するための光源構造の設計指針を、モード結合理論による解析により定量化した。また、GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子井戸と正方格子ロッド型フォトニック結晶スラブを組み合わせた具体的な光源を設計・作製し、ほぼ単峰で Q 値 100 を超える狭帯域熱輻射スペクトルを実証した。
2. 開発した高 Q 値熱輻射光源に電流注入加熱機構を導入し、不要な熱伝導損失・熱輻射損失の抑制手法を確立して、低消費電力で動作可能な熱輻射光源の開発を行った。開発光源の熱輻射特性の評価を行った結果、同電力投入時に、目標波数において黒体輻射光源の 12 倍以上の輻射強度が得られることを実証した。
3. 量子井戸構造を pn 接合内部に導入し、印加電圧により量子井戸の電子密度を変調することで、熱輻射強度の高速変調を実現した。開発した光源では、狭帯域(Q 値 72)かつ高放射率(0.74)な熱輻射ピークの電圧変調動作が確認され、従来光源と比較して約 4 桁高速な、周波数 600 kHz での高速変調動作が実現した。加えて、熱輻射スペクトルの発光線幅や発光波長が印加電圧により操作可能な、従来にない新機能を有する熱輻射光源の開発にも成功した。

以上で開発された高効率・高速熱輻射光源は、従来の熱輻射光源が抱えていた広帯域発光・低速応答という課題を克服するものであり、熱輻射光源の応用分野を大きく拡張する飛躍的進展であるといえる。さらに、本論文は、熱輻射現象を時間軸上で高速に制御した世界初の実証であり、熱輻射制御の研究に新しい可能性を創出した点も評価できる。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、平成 28 年 2 月 5 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。