

京都大学	博士 (工学)	氏名	Dongyeon Kang
論文題目	Mid-Wavelength Infrared Thermal Emitters using GaN/AlGaN Quantum Wells and Photonic Crystals (GaN/AlGaN 量子井戸とフォトニック結晶に基づく中波長赤外熱輻射光源の開発)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、GaN/AlGaN 量子井戸を用いた狭帯域な吸収係数スペクトルの制御と二次元フォトニック結晶による光共振モードの制御を行うことにより、中波長赤外領域中の所望の波長で狭帯域な強い輻射を発生する、高温動作可能な熱輻射光源を開発し、既存の狭帯域熱輻射光源の動作波長域の拡大と高出力化に成功した成果をまとめたものであって、6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記述される広帯域な発光スペクトルを有する。また、輻射強度が光源温度で決定されるため高速制御が不可能である。ここで、もし所定の目的波長のみで発光し、温度変調以外の方法で輻射強度の高速変調が可能な光源が実現すれば、赤外分光法・中赤外センシング等の種々の応用が期待される。しかしながら、これまで報告された狭帯域な熱輻射光源は、スペクトルの制御性もしくは光源材料の低耐熱性の課題が存在し、ガスセンシングなどの用途で重要な中波長赤外領域(3~8 μm)での実証は困難であった。本論文では高温耐熱性と波長選択性が優れた GaN/AlGaN 量子井戸のサブバンド間遷移を利用し、それを 2次元フォトニック結晶と組み合わせることで、中波長赤外領域で熱輻射の狭帯域化と高出力化を実現している。具体的には、GaN/AlGaN フォトニック結晶熱輻射光源の高温動作(>700$^{\circ}\text{C}$)と大面積動作を実現し、従来のフォトニック結晶熱輻射光源と比較して、10倍以上の輻射出力を中波長赤外領域で達成した。また、上記光源の熱輻射強度の電圧制御の初期実証を行い、高速変調への可能性を示している。以上の結果は、狭帯域熱輻射光源の従来の課題を乗り越えた重要な進展である。</p> <p>第1章は序論である。まず研究背景として、熱輻射光源に求められる特性と熱輻射スペクトル制御の原理が説明された上で、先行研究の熱輻射制御の実施例と課題が示されている。特に、狭帯域・低バックグラウンド輻射・電圧制御が実現された GaAs 系熱輻射光源の例を説明した上、GaAs 系材料が有する根本的課題（高温耐熱性の欠如・吸収係数制御帯域の制限など）を克服する方法として、GaN/AlGaN 量子井戸を用いた吸収係数スペクトル制御とフォトニック結晶を利用した光共振モード制御を併用した狭帯域かつ高出力な中波長赤外熱輻射光源が提案されている。</p> <p>第2章では、中波長赤外領域の狭帯域熱輻射光源の実現に向けて、その材料となる GaN/AlGaN 量子井戸の設計および評価結果が示されている。具体的には、はじめに、GaN/AlGaN 量子井戸中の電子状態に関する理論検討が、材料特性を考慮した上で行われており、GaN/AlGaN 量子井戸の適切な設計により目的の波長で所望の吸収係数スペクトルが得られることが示されている。本章の後半では、GaN/AlGaN 量子井戸が作製され、その量子井戸のサブバンド間遷移による吸収特性が評価されている。その結果、波長 4 μm 付近において、狭帯域 (Q~6)な吸収係数スペクトルが得られることが確認さ</p>			

れている。

第3章では、前章で設計した GaN/AlGaN 量子井戸にフォトニック結晶構造を導入し、中波長赤外領域の単峰かつ狭帯域な熱輻射光源を開発した結果が示されている。具体的には、フォトニック結晶スラブの光共振モードを量子井戸のサブバンド間遷移による吸収と結合させ、共振モードの吸収損失と放射損失の整合を考慮した熱輻射光源の設計が行われている。本章の後半では、光源の実証について説明されている。はじめに、本構造の作製手法の開発が本研究の重要な成果として詳細に説明され、輻射面積 1.8 mm^2 を有する GaN/AlGaN フォトニック結晶スラブ構造が作製されている。その後、フーリエ赤外分光器による作製光源の熱輻射スペクトルの評価結果が示されており、波長 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 付近において、ほぼ単峰で、 Q 値 93 かつ放射率 0.45 という狭帯域な熱輻射ピークが実証されている。さらに、輻射強度の光源温度依存性について考察が行われ、 700°C での安定的な動作により、従来の光源より一桁程度大きい輻射強度が達成されている。

第4章では、中波長赤外領域の狭帯域熱輻射光源の更なる高出力化を実現した結果が示されている。具体的には、第3章で開発された GaN/AlGaN 熱輻射光源の更なる高出力化のために、光源の大面积化が行われている。第3章の熱輻射光源は2次元的な光共振モードの形成にスラブ構造を利用しており、その弱い機械的強度により作製可能な光源面積が制限されることが説明され、大面积化のために低屈折率基板を導入することが提案されている。実証に用いる基板としてサファイア基板が採用され、基板導入に伴う光学設計の問題点とその克服法に関して議論されている。その後、サファイア基板上 GaN/AlGaN フォトニック結晶熱輻射光源の作製が行われ、 10 mm^2 と大きい面積を持つ熱輻射光源を実現している。さらに、作製光源の評価を行い、大面积・高温動作による高出力動作を実証している。

第5章では、GaN/AlGaN 熱輻射光源において、電氣的に熱輻射強度を制御するための光源設計および実験結果が示されている。具体的に、GaN/AlGaN 量子井戸を pn ダイオードの内部に配置し、電圧を印加して量子井戸の電子密度を制御することで、GaN/AlGaN 量子井戸の吸収係数の電圧制御、さらには光源の放射率の電圧制御を実現している。本章の前半では、pn ダイオードの内部に導入した GaN/AlGaN 量子井戸のバンド構造の理論解析を通して、高温での電圧制御に適した pn ダイオードおよび量子井戸構造の設計が行われ、実験的にもサブバンド間吸収の電圧制御動作が実証されている。本章の後半では、上記の GaN/AlGaN 量子井戸構造にフォトニック結晶構造を導入した熱輻射光源の作製プロセスが確立され、 500°C という高温動作により波長 $4 \text{ }\mu\text{m}$ で狭帯域(Q 値 40)な熱輻射スペクトルの電圧制御が実現されている。

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。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、GaN/AlGaIn 量子井戸と二次元フォトニック結晶を利用することにより、中波長赤外領域中の所望の波長で狭帯域な強い輻射を発する熱輻射光源を実現したものである。一般的に熱輻射光源は広帯域な発光スペクトルを示し、それを克服する様々な狭帯域熱輻射光源が提案されてきたが、不十分なスペクトル制御や高温耐熱性の制限による低い出力という課題を抱えていた。それに対し本論文では、高温耐熱性と物質内吸収の波長制御性に優れた GaN/AlGaIn 量子井戸に着目し、それを用いた狭帯域な吸収係数スペクトルの制御と二次元フォトニック結晶による光共振モードの制御を同時に行うことにより、高温・高出力な狭帯域な発光スペクトルとその電圧制御を実現している。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. GaN/AlGaIn 多重量子井戸において、所定の波長に狭帯域なサブバンド間吸収を生成するための設計と評価を行った。さらにフォトニック結晶を導入し、放射率ピークの最大化と面垂直方向への輻射を可能とする熱輻射光源の設計を行った。その後、GaN/AlGaIn 狭帯域熱輻射光源の作製手法を確立した。作製した熱輻射光源を評価し、波長 4 μm 付近で極めて狭帯域($Q \sim 100$)な熱輻射スペクトルを 700 $^{\circ}\text{C}$ という高温において実証した。
2. GaN/AlGaIn 熱輻射光源において、大面積化による高出力化を実現するため、2次元フォトニック結晶を支持する低屈折率基板を導入することを提案・実証した。具体的には、サファイア基板の導入により 10 mm^2 以上の大面積光源を作製することに成功し、基板を導入しない光源と比べて 10 倍以上の高出力化を実現した。
3. 熱輻射強度が温度以外に物質の吸収係数にも依存することに着目し、GaN/AlGaIn 量子井戸の電子密度を pn 接合への印加電圧で制御することで、中波長赤外領域の熱輻射強度の電圧制御を実証した。はじめに、室温で GaN/AlGaIn 量子井戸の電子密度制御を行い、サブバンド間吸収の電圧変調動作を確認した。続いて、狭帯域熱輻射の電圧制御に適したフォトニック結晶光源の設計・作製を行い、波長 4 μm 付近で、狭帯域($Q > 40$)熱輻射スペクトルの電圧変調を 500 $^{\circ}\text{C}$ という高温下において実証することに成功した。

以上で開発された GaN/AlGaIn 狭帯域熱輻射光源は、従来の狭帯域熱輻射光源の課題を克服した重要な進展であると位置づけられ、今後、熱輻射光源の応用分野を大きく拡張することが期待される。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 30 年 4 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 1 4 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。

要旨公開可能日： 2018 年 7 月 30 日以降