

京都大学	博士（工学）	氏名	Thirimadura De Zoysa Menaka Chaminda
論文題目	Thermal Emission Control by Intersubband Transitions in Quantum Wells and Two-Dimensional Photonic Crystals (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を用いた熱輻射制御)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、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を用いて、物質の電子系と光子系をそれぞれ制御し、熱輻射を狭い周波数帯域に限定できることを実証したものであり、7章から構成される。 熱輻射光源は、加熱するだけで広い周波数帯域にわたって発光するため、照明や分光分析などに広く応用されている。しかし、応用上必要とされる周波数帯域は非常に狭く、広い熱輻射スペクトルの大部分は利用されないため、熱輻射光源のエネルギー利用効率は非常に悪い。そこで、不要なスペクトル成分を抑え、所望の周波数帯域でのみ発光するように熱輻射を制御できれば、光源のエネルギーの利用効率は大幅に改善できると考えられる。 これまで、熱輻射制御は、主に金属表面などに微細構造を導入し、物質の光子系を制御することによって盛んに行われてきた。しかし、光子系の制御範囲は、金属などの熱輻射スペクトルと比べて非常に狭いため、十分な熱輻射制御が実現されているとはいえない。それに対して、本論文では、物質の光子系の制御に加え、電子系も制御する新たな二段階の制御方法によって、熱輻射を狭い周波数帯域に限定できることを示している。具体的には、n-型ドーピングした量子井戸のサブバンド間遷移を用いて電子系を制御し、所望の周波数で熱輻射帯域をある程度限定させている。その上で、2次元フォトニック結晶を用いて、光子系の制御を行い、熱輻射帯域をさらに限定させている。 このような二段階の制御方法を実証した結果、本論文では、中赤外線領域の設計波長において、輻射帯域が従来の黒体の1/30程度狭く、かつ輻射強度が黒体の80%程度と強い熱輻射ピークを実現することに成功している。さらに、n-型ドーピングした量子井戸の面内に沿って電流を注入し、抵抗加熱できる光源も実現し、一定の入力電力時において、本光源の熱輻射ピーク強度が黒体の4倍程度まで増大化できることも実験的に示されている。また、上記の二段階制御方法に基づく光源において、これまでにない高速の熱輻射発生・消滅が実現可能であることも原理実証されている。以下、各章の内容を要約する。 第1章では、先行研究の検討を通して、熱輻射制御を実現する上での課題を明らかにし、さらにそれらの課題を解決する方法として、前述した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を用いた二段階の熱輻射制御を提案している。 第2章では、熱輻射制御に関する基本原理を説明している。まず、物質と光の相互作用に着目して、物質からの熱輻射について解析されている。次に、それらの解析に基づき、熱輻射の制御は物質の吸収の制御に等価である(キルヒホッフの法則)ことが説明されている。それに従い、熱輻射を制御すべくパラメーターとして、物質の吸収係数(電子状態)、および物質の光子状態があげられ、それぞれの制御には、吸収波長が人為的に制御可能かつ単峰性の吸収特性をもつn-型量子井戸のサブバンド間遷移と、自在な光子状態の制御が可能である2次元フォトニック結晶構造が適切であることが述べられている。			

第3章では、熱輻射制御の第一段階として、量子井戸のサブバンド間遷移を利用して物質の吸収係数を制御し、熱輻射帯域を所望の周波数に限定できることを原理実証している。実証に当たってまず、量子井戸のサブバンド間遷移を有する GaAs/AlGaAs の n-型量子井戸の設計・作製し、さらに量子井戸構造に外部光を入射し、吸収特性を測定することで、設計通りの吸収特性が得られたことを確認している。その上で、量子井戸構造を加熱し、熱輻射特性を測定し、設計波長帯域において、吸収特性を反映した量子井戸のサブバンド間遷移由来の熱輻射ピークを観測することに成功している。熱輻射ピーク線幅は 10-16 meV 程度と、同温の黒体の 1/10 程度狭く、放射率は 90%以上のものが実現されている。

第4章では、熱輻射の更なる狭帯域化を第一目的とし、量子井戸層に空気孔 2 次元フォトニック結晶を導入し、フォトニックバンド端共振器による光子状態の制御を行っている。まず、バンド端をサブバンド間遷移波長帯域に一致させた構造を検討し、3 次元有限差分時間領域法によって、光源の放射率(吸収率)スペクトルを数値計算している。特定のバンド端をサブバンド間遷移波長に合わせることで、線幅が 4 meV 程度狭く、放射率が 80%程度と強い面垂直への放射ピークが実現可能であることを計算で示されている。次に、これらの計算結果を実証するために、光源構造を作製し、光源を実際に加熱したときに、面垂直に得られる熱輻射を分光している。実現した光源からのスペクトルを黒体光源と比較したとき、本光源の輻射線幅は (4.5 meV) 黒体の 1/30 程度と狭く、かつその放射率が 80%程度であることが実験的に明らかにしている。さらに、本光源の放射角度特性も測定し、面垂直に集中した高指向性の熱輻射が実現されていることも示している。

第4章まで、帯域制御した光源と黒体光源を外部ヒータで同温に加熱することで、基礎特性評価を行っていた。5 章では、帯域制御した光源に投入されるエネルギーがどのようにねらった輻射成分として放射されるかを定量的に評価するため、電流注入で加熱できる光源を実現し、入力電力に対する輻射強度や光源の温度などについて検討している。第一に、入力電力がねらった熱輻射としてのみ消費されるように、光源における不要な熱損失をできる限り抑制した光源の作製を行っている。また、比較試料として黒体光源も用意している。そこで第二に、両者に同じ電力を投入したとき、帯域制御した光源の温度は、黒体と比べて著しく上昇し、その輻射強度は黒体強度の 4 倍程度まで増大化ができることを示している。この結果は、黒体では不要なスペクトル成分を介して放射されるパワーが、帯域制御した光源ではねらった帯域に集中して放射されていることを明確に示したものだといえる。

第6章では、外部光入射によって、量子井戸中にキャリアを動的に発生・消滅し、サブバンド間吸収を動的に制御して、これまでになかった高速で熱輻射を発生・消滅できることを原理実証している。まず、用意した光源構造である無添加の量子井戸を有するフォトニック結晶について説明している。次に、入射光によって、量子井戸中に励起されるのキャリアの密度、光源の温度上昇などについて詳細に検討している。続いて、実験を行い、外部光入射によって、動的に熱輻射を発生できることを原理実証している。

第7章では、本論文において得られた成果をまとめるとともに、今後の展開について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、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を用いて、物質の電子系と光子系をそれぞれ制御し、通常広い周波数を有する熱輻射を狭い周波数帯域に限定できることを実証したものである。これまで、熱輻射制御は、主に金属表面などに微細構造を導入し、物質の光子系を制御することによってなされてきたが、光子系の制御範囲は、金属などの熱輻射帯域と比べて非常に狭く、十分な制御が未だ実現できていない。それに対して、本論文は、物質の光子系の制御に加えて、電子系も制御するといった新たな二段階の制御方法によって、熱輻射を狭い周波数帯域に限定できることを示している。具体的な手法としては、n-型ドーピングした量子井戸のサブバンド間遷移を用い、電子系を制御し、熱輻射帯域をある程度限定させ、その上で、2次元フォトニック結晶を用いて光子系の制御を行い、熱輻射帯域をさらに限定している。本研究で得られた成果は、高効率太陽光熱発電や高効率熱輻射光源を実現する上で、非常に重要である。以下、本研究において得られた主な成果をまとめる。

1. 電子系を制御して熱輻射帯域を限定するため、量子井戸のサブバンド間遷移を有する n-型 GaAs/AlGaAs の量子井戸を設計・作製した。その後、量子井戸構造を加熱して熱輻射特性を測定し、確かに設計波長帯域において、量子井戸サブバンド間遷移由来の熱輻射ピークを発生できることを実証した。その結果は、熱輻射ピーク線幅は 10-16 meV 程度と同温の黒体の 1/10 程度狭く、輻射強度は黒体の 90%以上強いことを示した。
2. 熱輻射の更なる狭帯域化を目指して光子系を制御するために、量子井戸層に空気孔を導入した 2 次元フォトニック結晶構造を提案し、理論検討を行い、適切な光源構造を設計した。設計通りの光源を作製した後、外部ヒータで光源を加熱し、面垂直への放射を分光し、本光源は狭帯域かつ高強度であることを実証した。得られた結果は、輻射線幅は (4.5 meV) 黒体の 1/30 程度と狭く、輻射強度は黒体の 80%程度と強いことを示した。また、本光源の放射角度特性を測定し、面垂直に集中した高指向性の熱輻射が実現されていることも明にした。
3. 上記の二段階制御に基づいた高効率電流注入型熱輻射光源の実現に向けて、光源における不要な熱損失を抑制した最適な光源構造を設計・作製した。また、比較光源として黒体も用意した。両者に同じ電力を投入すると、帯域制御した光源では、不要な熱輻射成分が抑制されていることを反映して、光源の温度は、黒体と比べて著しく上昇し、その輻射強度は、黒体の 4 倍程度まで増大化できることを明確に示した。

上記の熱輻射制御方法は、物質・光の相互作用を表す基本要素となる電子系と光子系をそれぞれ自在に制御したものであり、物理的に興味深いといえる。さらに、本研究で開発した熱輻射光源は、従来の低効率、低出力パワーの中赤外発光ダイオードの代わりに応用可能であると期待できる。また、上記の熱輻射制御方法は、太陽光スペクトルを光電変換セルの受光特性に適した狭帯域な光に変換して発電を行う太陽光熱発電の効率を向上する上でも、重要である。よって、本論文の成果は、学術上、応用上、重要なものと評価でき、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成 24 年 1 月 30 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、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。