

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年3月11日現在

自在な熱輻射制御のための新技術/概念の構築

Development of new techniques/concepts for arbitrary thermal emission control

課題番号：25220607

野田 進 (Noda Susumu)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

本研究では、電子系と光子系の両状態制御により、物体からの熱輻射を、エネルギー損失なく、望む波長に望む線幅で集約する技術、また、熱輻射を動的かつ超高速に制御する技術など、高温物体からの熱輻射を自在に制御・利用するための新技術や概念を構築し、「高温ナノフォトニクス」というべき学術分野の基礎の確立を目指す。

研究分野：工学

キーワード：フォトニック結晶，熱輻射，熱光発電

1. 研究開始当初の背景

一般に、高温物体からの熱輻射は、極めて幅広いスペクトルを有し、応答速度は極めて遅い。このことが、熱輻射を活用した光源のエネルギー利用効率の悪さ、動作速度の遅さにつながっている。ここで、熱輻射を、望む波長・線幅に集約し、さらに、その応答速度を極めて速くする技術が確立すれば、高効率・高速の分析用光源としての発展、また、太陽光熱発電における光電変換効率の大幅な増大につながるものと期待される。

通常、熱輻射は、連続した周波数をもつ電子系と光のランダムな相互作用により起こるために、幅広いスペクトルをもつ。研究代表者等は、電子系と光子系の状態を同時に制御し、相互作用が特定の限られた波長域のみ強く起こるようにするという独自の概念を提唱し、本基盤研究 S 開始段階において、黒体の 1/30 程度に熱輻射スペクトルの線幅を狭め、投入した電力が、この狭い熱輻射スペクトルに集約可能であるということを世界で初めて示すことに成功していた。

2. 研究の目的

本研究では、上記の概念に基づく熱輻射制御をさらに発展させることを目指し研究を進めた。具体的な研究対象として、(I)熱輻射の線幅のさらなる狭帯域化、(II)熱輻射を動的かつ超高速に制御する技術の確立、(III)熱輻射の集約波長を、近赤外へと展開する手法の開拓、(IV)黒体リミットを超えて、熱輻射強度を引き出す概念・手法の開拓、の4つを設定し、自在な熱輻射のための新技術/概念の

構築、さらには新しい学問領域「高温ナノフォトニクス」の基礎の構築という目標を掲げて研究を行った。

3. 研究の方法

**試料作製**：中赤外域の素子については、GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を、近赤外域の素子については、主として Si を用いた。電子ビーム露光、ICP エッチングによる加工により、フォトニック結晶の作製を行なった。

**試料評価**：試料の加熱はヒータによる直接加熱または電流注入によるジュール加熱によって行った。熱輻射の評価には、中赤外領域は MCT 検出器および FTIR を、近赤外領域は InGaAs 検出器を利用した測定を行った。

**解析**：大型計算機等を利用し、RCWA 法、FDTD 法などの解析手法により行なった。

4. これまでの成果

前述の研究課題のうち、(I)~(III)の項目について推進するとともに、(IV)の項目については検討に着手した段階である。以下にこれまでに得られた成果を、纏めて述べる。

(I)熱輻射の線幅のさらなる狭帯域化：

本項目では、研究開始段階において達成した黒体輻射の 1/30 程度 ( $Q$  値にして 30 程度)の線幅の熱輻射制御の、さらなる狭帯域化を目指した検討を行った。

まず、フォトニック結晶構造の設計を行い、量子井戸ロッドを正方格子状に並べた構造を利用するとともに、単位格子内に半径の異なる 2 種類のロッドを半周期ずらして配置し、それらの半径の差を微調整することで、単峰かつ狭線幅の光子系の状態を形成した。さら

に量子井戸数やドーピング量を調整し電子系の状態制御をも行った結果、図1に示すように、中赤外域で $Q$ 値100を超え、かつ同一投入パワーの黒体と比較して12倍の強度の熱輻射を実証することに成功した。さらに、サブバンド間遷移の吸収 $Q$ 値を増大させることで、最大 $Q > 200$ の実現にも成功した。

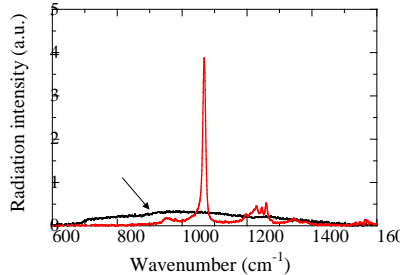


図1：同一パワー投入時の作製光源および比較用黒体からの熱輻射スペクトル。 $Q$ 値100を超える線幅と、黒体の12倍以上の輻射強度を実証した。

**(II)熱輻射を動的かつ超高速に制御する技術の確立**：通常、熱輻射光源の強度変化は光源の温度変化に従うため、直接変調の応答時間は数ミリ秒～数秒程度と遅くなる。これに対して我々は、温度ではなく、物体の吸収率、すなわち電子系の状態を時間領域で制御するという新たな概念を提案し、電気制御による高速変調の実証を行った。

上記の実現のため、p-n接合内に量子井戸を形成した熱輻射光源を考案した。本構造に逆バイアスを印加し、量子井戸の第1サブバンドに存在する電子を引き抜くことで、サブバンド間遷移を抑制し、吸収率を動的に減少させる。図2(a)(b)に、逆バイアスを印加しない場合と10Vの逆バイアスを印加した場合の赤外カメラ像を示す。逆バイアス印加により熱輻射強度が抑制されていることが分かる。また図2(c)に、熱輻射強度の周波数依存性の測定結果を示す。電気的な制御により、従来法の温度変化による変調と比較して、10,000倍という高速での熱輻射の変調に成功した。

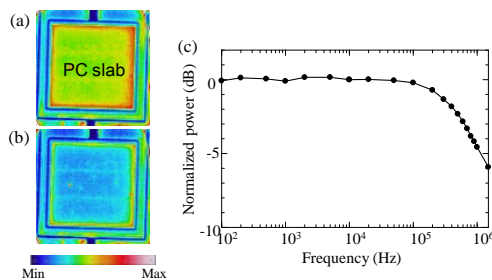


図2：(a)(b)素子からの輻射の赤外線カメラ像。(a)逆バイアスを印加しない場合(b)10Vの逆バイアスを印加した場合。(c)熱輻射強度の周波数依存性。

**(III)熱輻射の集約波長を、近赤外へと展開する手法の開拓**：熱光発電等へと展開していくためには、熱輻射の集約波長を、近赤外域(～1 $\mu$ m域)へと展開することが重要である。本

研究では、バンド間遷移波長が1 $\mu$ m近傍にあり、融点が1,680Kと高いSiを用いた光源の検討を行った。その結果、真性キャリアによる中赤外域における不要な光吸収(熱輻射)を抑制しつつ近赤外域の光共振作用をもたらすことが可能な、ロッド型フォトニック結晶が有効であることを見出し、波長1 $\mu$ mより短波の領域で高い放射率を示し、かつ長波側については広い波長域にわたって放射率を抑制することに初めて成功した。

## 5. 今後の計画

(I)に関しては、これまで実現してきた $Q$ 値のさらなる増大を目指す。現状の $Q$ 値は、フォトニック結晶構造の不均一性により決まっていると考えられるため、今後、構造の面内均一性の更なる向上に取り組む。(II)に関しては、1つのチップ上の“異なる”位置から異なる波長を放射可能な高速切り替え型熱輻射光源、および1つのチップ上の“同じ”位置から異なる複数波長をスイッチ可能な熱輻射光源の開発を目指していく。(III)に関しては、太陽光熱光発電への展開の基盤技術開発に向けて、光源物理の深化と、その大面積化の検討を行っていく。(IV)に関しては、電子系・光子系に状態制御を行った光源と受光デバイスを近接させ、通常は遠方に放射されない近接場光成分を利用することで、上記の限界を超える狭帯域な熱輻射の授受の実証を目指していく。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む) 発表論文

1. T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, *Applied Physics Express*, vol. 7, pp. 012103, (2014).
2. T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, *Nature Materials*, vol. 13, pp. 928-931, (2014).
3. T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, *Physical Review B*, vol. 91, pp. 235316, (2015).
4. T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, *Optica*, vol. 2, pp. 27-35, (2015).

上記を含め発表論文12件以上、国際学会発表36件以上(招待講演24件含む)

## 受賞等

1. 野田進:紫綬褒章, 2014年11月。
2. 野田進:応用物理学会業績賞, 2015年3月。
3. 井上卓也:日本学術振興会育志賞, 2016年1月。
4. 末光真大, 野田進他:SPIE Green Photonics Award, 2016年2月。  
他4件を含め合計8件

## ホームページ

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>