

物体からの熱輻射を超高速に制御することに世界で初めて成功

概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 野田 進 教授（兼、光・電子理工学教育研究センター長）、同専攻 浅野 卓 准教授 および同専攻 井上 卓也 博士課程学生等は、物体からの熱輻射^{*1}を超高速に制御することに、世界で初めて成功しました。

一般に、物体を加熱すると、物体と光の相互作用に基づいた熱輻射と呼ばれる現象が生じ、物体から光が放射されるようになります。白熱電球や太陽などは、まさしく、この現象に基づいて光を放射します。しかしながら、加熱された物体からの熱輻射をオン・オフするためには、物体自体を温めたり冷やしたりする必要があるため、そのオン・オフには相当な時間（数秒～1/100 秒程度、周波数にすると 1～100Hz）がかかるという問題がありました。今回、同研究グループは、物体の温度を上昇・低下させるのではなく、物体と光の相互作用そのものを電氣的に変化させることにより熱輻射を超高速に制御するという、全く新しい方法を見出しました。その結果、物体から生じる熱輻射のオン・オフの切り替えが、従来と比較して 6,000 倍以上の速度（周波数にして 600kHz）で可能になりました。この成果は、物理的に大変興味深い結果であるだけでなく、各種の環境センシングやバイオ分析用の新しい赤外線光源の実現にもつながり、様々な新しい応用をもたらすものと期待されます。

本研究成果は、英国の学術誌「Nature Materials」の電子版に 7 月 28 日（日本時間）に出版されます。

1. 背景

一般に、物体を加熱すると、光（電磁波）が放射されます。これは、物体と光の相互作用に基づく熱輻射と呼ばれる現象によるものです。物体を加熱するだけで簡便に光が放射され、かつ様々な波長の光を放射出来るという性質ゆえに、これまで白熱電球や赤外光源を始めとする、様々な光源の基本原則として活用されてきました。しかしながら、このことは逆に、通常の熱輻射光源は必要とする波長の光のみならず、その他の多くの波長成分（スペクトル）をもつ光を発生するため、エネルギー利用効率が極めて低いということも意味しています。また、熱輻射のオン・オフは、物体の温度の上げ下げで行うことが一般的であるため、動作速度が極めて遅いという課題がありました。ここで、もし熱輻射を利用した光源が、望まない波長の光は放射せず、かつ、従来に比べ格段に速いスピードで光放射をオン・オフ出来るようになれば、高効率かつ高速に動作する次世代型熱輻射光源が誕生するものと考えられます。

上で述べた背景のもと、我々はまず 2012 年に、不要な波長の放射をなくし真に必要な波長の光のみを発生することが出来る、言い換えれば、高度にスペクトル制御された熱輻射光源の実現に成功しました（http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120709_1.htm）。具体的には、熱輻射の基本原則となる物体と光の相互作用に注目し、その相互作用が特定の波長でのみ生じるように光と電子の両状態を制御するという、新しい方法を提案・実証しました。今回は、もう一つの重要な課題、すなわち、このようにスペクトル制御された光源からの熱輻射を、従来のような物体の温度制御とは全く別の原理で、超高速に制御することに取り組みました。その結果、これまでよりも 6,000 倍以上高速に熱輻射をオン・オフすることに世界で初めて成功しました。以下、その手法、成果、波及効果、今後の展開等に

ついて説明します。

2. 研究手法・成果

上で述べたような熱輻射パワーの高速変化を実現するためには、物体から熱輻射が生じる過程をミクロな視点から考える必要があります。一般に、物体の温度を上昇させると、物体内の電子の動きが活発になり、光（電磁波）を放出するようになります。こうして電子から発せられた光は、物質内部で再び電子と相互作用し吸収されます。このような光の放出と吸収は物質内で繰り返し行われ、やがて熱的に安定した状態に落ちつき、その結果、物体からその温度に応じたパワーの光（熱輻射）が放出されるようになります。この過程を考慮すると、物体の温度を変化させなくても、物体内部で生じる電子と光の相互作用の大きさを直接制御することができれば、熱輻射パワーを変化させられることがわかります。例えば、物体内で光を放出・吸収する電子そのものの数を高速に変化させることができれば、それに伴い物体から生じる熱輻射のパワーも高速に変化することが期待されます。

上記の考えに基づき、今回開発した熱輻射光源の構造を図 1(a)に示します。本光源は、

- ① 2種類の半導体の薄い層を交互に積層した構造(量子井戸※2)
- ② ①の層を挟む p 型層と n 型層 (PN ダイオード※3)
- ③ ①②の層に空気孔を周期的に導入した人工的な光ナノ構造 (フォトニック結晶※4)

の3つの構造を組み合わせることで構成されています。

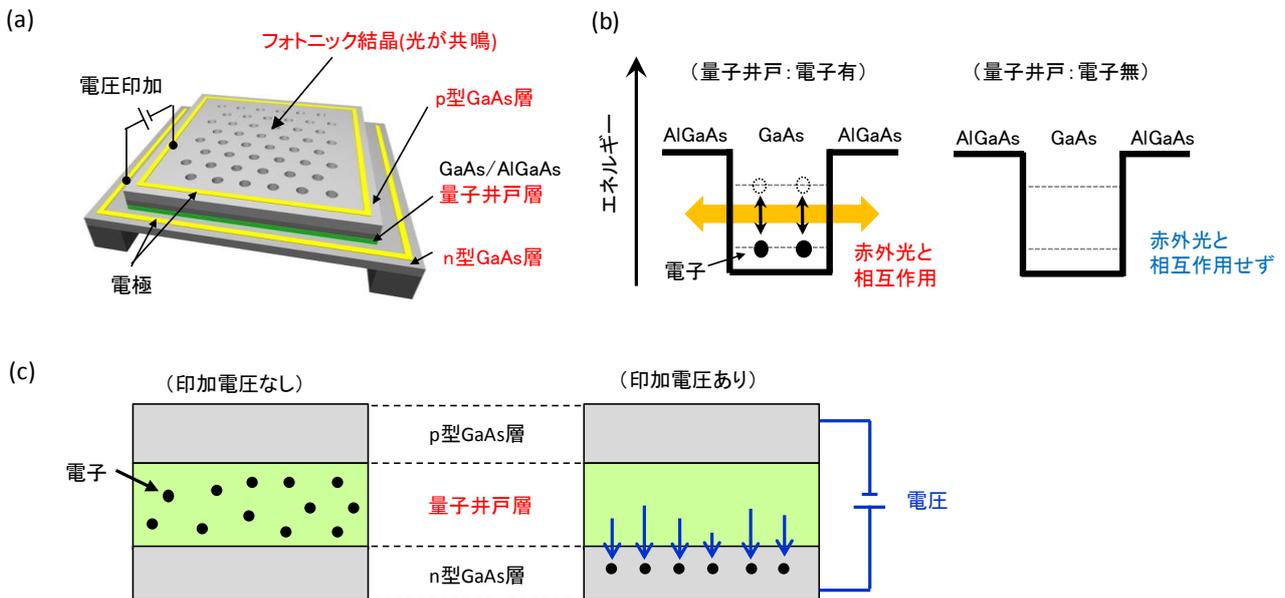


図 1 (a) 電圧により輻射パワーを変化させることができる熱輻射光源の模式図 (b) 量子井戸内に電子が存在する場合(左)と存在しない場合(右)の熱輻射発生の模式図。量子井戸には、離散化された2つのエネルギー状態が存在し、電子は加熱されるとこの2つのエネルギー状態間の遷移を繰り返す。(c) PN ダイオードに電圧を印加した際の量子井戸内の電子密度の変化。電圧を印加すると、量子井戸に存在する電子数が減少する。

本光源を加熱すると、量子井戸内の電子は離散化された2つのエネルギー状態間の遷移を繰り返し、2状態のエネルギー差で決まる波長を中心に赤外光を放出・吸収します[図 1(b)左]。このとき発生した光は、③のフォトニック結晶構造内で強く共鳴しつつまた電子と相互作用し、最終的に光源の外部に熱輻射として放射されます。しかし、量子井戸から電子を追い出すことが出来れば、加熱しても量子井戸か

ら赤外光が生成しません[図 1(b)右]。この 2 つの状態 (すなわち、図 1(b)の左右) を高速に切り替える仕組みが②の PN ダイオードです。ダイオードに電圧を印加しない状態では、量子井戸内に電子が存在して[図 1(c)左]、強い熱輻射が発生しますが、n 型層が正となるような電圧を印加すると、量子井戸内の電子が量子井戸の外へと移動するため[図 1(c)右]、熱輻射強度が大きく減少します。

図 2 には、本光源の顕微鏡写真と、100°Cに加熱した際に生じた赤外線パワーの測定結果を示します。ダイオードに電圧を印加しない場合、フォトニック結晶を作製した領域から周囲よりも強い熱輻射が生じていますが、電圧 10V を印加することでその熱輻射パワーが減少していることがわかります。このように光源の温度を変化させなくても、電子系と光の相互作用の大きさを直接制御することにより熱輻射をオン・オフできることを、明確に実証することに成功しました。

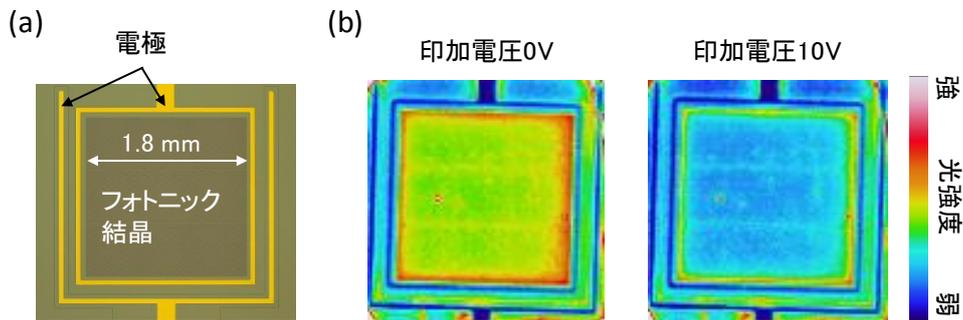


図 2 (a) 作製光源の顕微鏡写真 (b) 作製光源から生じる熱輻射パワーが印加電圧により変化する様子

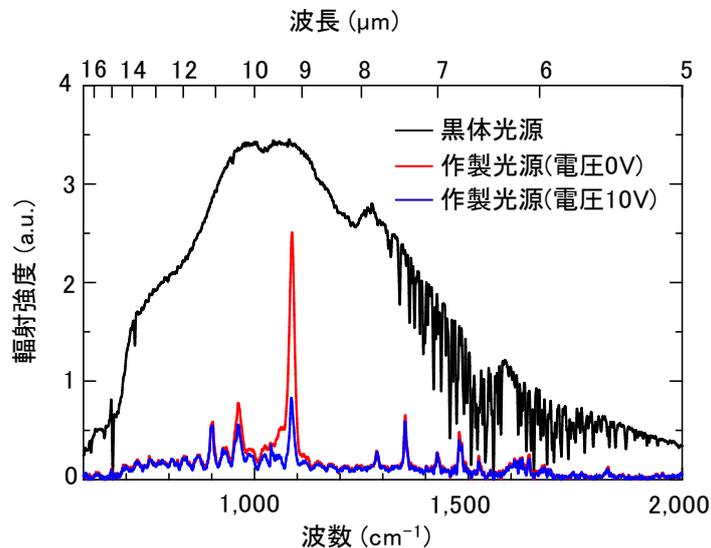


図 3 電圧印加なし (赤線) および電圧印加時 (青線) の作製光源の 200°Cにおける熱輻射スペクトル。同温度、同面積の黒体輻射光源の熱輻射スペクトルを黒線で示す。

図 3 には、本光源を 200°Cに加熱した際に生じる熱輻射スペクトル (輻射パワーの波長依存性) を示します。比較のため、同じ温度に加熱された同面積の黒体輻射光源 (一般的な熱輻射光源) のスペクトルも合わせて示しています (黒線)。同図より、本光源では波長 9.2 μm に集中した極めて狭帯域な発光が生じており (赤線)、そのピークパワーは印加電圧により大きく減少することがわかります (青線)。

ここで、狭帯域な発光が実現出来ているのは、量子井戸とフォトニック結晶の効果により、波長 $9.2\mu\text{m}$ 付近のみで電子と光が強く相互作用することに基づいています。また、電圧印加により、発光ピークパワーが減少するのは、すでに述べたように、電圧印加により量子井戸層に存在する電子数が減少し、電子と光の相互作用そのものが生じなくなるためです。なお、ここでの発光波長は、 $9.2\mu\text{m}$ ですが、この発光波長は、量子井戸の構造やフォトニック結晶構造を変化させることにより、様々に変化させることが可能です。また、量子井戸の材料系を変化させることで（例えば、窒化ガリウム系の量子井戸を用いることで）、光通信で重要な $1.5\mu\text{m}$ 帯の光を発することも可能になると期待されます。

最後に、本光源に印加する電圧を 0 V と 10 V の間で高速に切り替えることで、光源から生じる熱輻射パワーの高速変調実験を行いました。印加電圧が周波数 10 kHz (1秒間に $10,000$ 回の速さ)で変化する際に得られた輻射パワーの時間変化を図 4(a)に示します。同図より、電圧の切り替えのタイミングで輻射パワーが瞬時に変化していることがわかります。印加電圧の周波数を変化させて輻射パワーの変化の大きさを測定した結果は図 4(b)のようになり、本光源は、周波数 600 kHz (1秒間に $600,000$ 回)まで応答することがわかりました。この値は、加熱・冷却を繰り返していた従来の熱輻射光源の限界速度の約 $6,000$ 倍に相当し、極めて高速な熱輻射のオン・オフに成功したと言えます。また、光源構造を最適化することで、さらに $10\sim 100$ 倍に高速化できることを数値計算により明らかにしています。

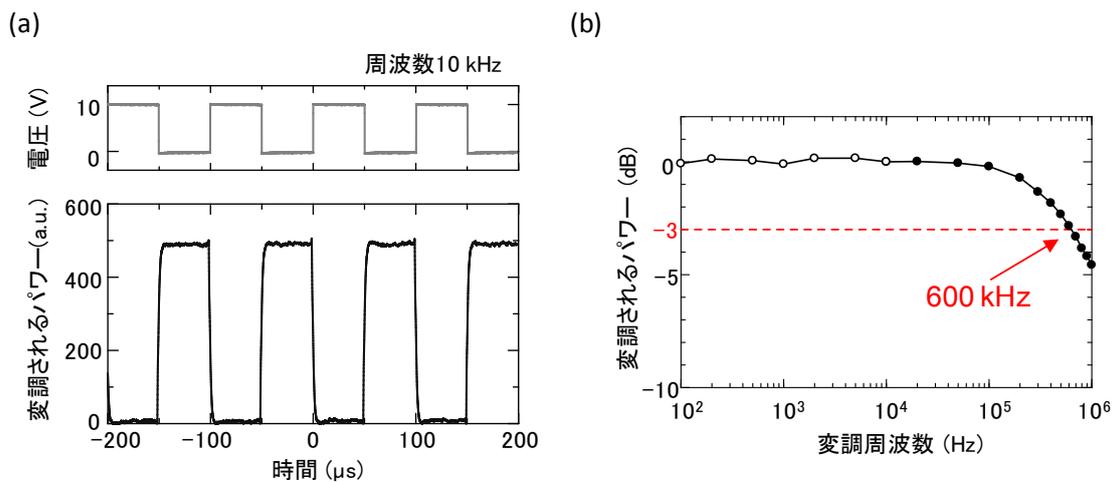


図 4(a) 変調周波数 10 kHz における光源への印加電圧(上)および光源の輻射パワー(下)の時間変化 (b) 変調される輻射パワーの周波数依存性

3. まとめと波及効果

今回の成果は、熱輻射のもつ「幅広過ぎるスペクトル」および「オン・オフに時間がかかりすぎる」という 2 つの課題を同時に克服することに世界で初めて成功したという点で、非常に重要な成果と言えます。従来の概念の「熱輻射光源」が、新たな時代に突入するきっかけを与えるものとも言えます。また今回の成果は、「熱輻射」という物体から外部へのエネルギー移動の現象を、時間軸上で高速に制御することが出来るようになったことを意味するため、多くの新しい物理現象の発現にもつながるものと考えられます。例えば、物体に一定のパワーを投入し続けながら、熱輻射をオフの状態からオンの状態に瞬時に切り替えると、その瞬間に投入パワーよりも大きな輻射パワーを物体から取り出すことも可能に

なると期待されます。

さらに、実用的な視点からみれば、今回実証した狭帯域な熱輻射の高速変調動作は、赤外線を利用した環境・バイオ分野のセンシング、イメージング等の応用において極めて有用な要素技術になることが期待され、超小型・安価・低消費パワーな分析が実現できると考えられます。

4. 今後の予定

今回の実証では熱輻射パワーの変化速度が従来の 6,000 倍、すなわち、約 1 MHz に達しましたが、今後は量子井戸材料や電極構造の工夫により変調速度をさらに 10~100 倍に高速化することを目指したいと考えています。また、今回の実証は 1 つの波長で動作する熱輻射光源における輻射“パワー”の変調でしたが、輻射波長の異なる複数の光源を集積化し、それらを高速に切り替えることで、熱輻射“波長”スイッチなども実現して行きたいと考えています。また、こうして端緒についた、「次世代型熱輻射光源」の更なる進化と、新しい物理現象の創出などをも行っていきたいと思っています。

5. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金、科学技術振興機構 CREST、および卓越した大学院拠点形成支援補助金の援助を受けて行われました。

6. 書誌情報

[DOI] <http://dx.doi.org/10.1038/nmat4043>

Takuya Inoue, Menaka De Zoysa, Takashi Asano and Susumu Noda

“Realization of dynamic thermal emission control”

Nature Materials, 2014/07/27/online

doi: 10.1038/nmat4043

<用語解説>

※1 熱輻射

物体を加熱した時に生じる光。太陽光(6000K)や白熱電球の光(約 3000K)などがその代表例である。一般的な物質を加熱した時に生じる熱輻射は、Planck の法則に従う非常に幅広いスペクトルを有することが知られており、そのパワーは物体の温度によって決定される。

※2 量子井戸

異なる 2 種類の半導体の薄い層(厚さ数 nm~数 10nm)を組み合わせることができるナノ構造体。一方の半導体の層に電子が閉じ込められることにより、電子がもつエネルギーが離散的になる。電子があるエネルギー状態から別のエネルギー状態に移動する時に光が放出(または吸収)されるが、エネルギーが離散的な値しかとれない量子井戸においては、放出(吸収)される光のエネルギー(波長)も特定の波長に限定される。

※3 PN ダイオード

P 型半導体(正の自由電荷が過剰に存在する半導体)および N 型半導体(負の自由電荷が過剰に存在する

半導体)を接合した構造。P側が正(N側が負)となる電圧(順バイアス)を印加すると電流が流れるが、P側が負(N側が正)となる電圧(逆バイアス)を印加しても電流が流れない。P型半導体とN型半導体の接合部には正の自由電荷も負の自由電荷も存在しない領域が形成されるが、逆バイアスを印加するとその領域が拡大する。

※4 フォトニック結晶

光の波長程度のオーダーで屈折率が周期的に変化する人工物質。通常、半導体(屈折率2~4)に周期的に空気孔(屈折率1)を導入することなどにより作製される。2次元的に空気孔を作製した2次元フォトニック結晶においては、2次元的な光の回折が生じ、大面積で共振する光共振モードが形成される。また、上記の回折効果により、面内を伝搬する光を面垂直方向に効率良く取り出すことなどが可能になる。