

2022年3月9日

報道関係者各位

慶應義塾大学
Rice University

広い波長帯域の偏光を直接発生させる熱光源を開発 —分析・センシング・光デバイスなど幅広い分野への応用に期待—

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧英之教授、米国 Rice 大学電気・コンピューター学科の Junichiro Kono 教授らの研究グループは、一次元のナノ材料であるカーボンナノチューブが高密度に配列・積層したカーボンナノチューブ配向膜（注1）を用いて、広波長帯域の偏光をダイレクトに発生させる電気駆動の熱光源（注2）の開発に成功しました。「熱光源からは非偏光しか得られない」といった従来の常識を覆す新しい光源であり、偏光を用いた様々な分野への応用が期待されます。

偏光を用いた技術は、分析・センシング・光デバイスなどの多くの分野で重要であり、基礎研究から産業界まで広く使われています。現在、偏光を直接発生させる光源としては、レーザー光源が用いられていますが、原理上、特定の単一波長の光しか得られず、その発光スペクトルは極めて狭いものとなっています。一方、非常に広い発光スペクトルを有する光源として、白熱電球等で知られる熱光源があり、主に可視～赤外の広い波長領域での光源として現在も広く利用されています。しかし、従来の熱光源は、非偏光の発光しか得られず直接偏光を発生させることができないため、偏光を利用するには、偏光板を組み込む必要がありました。

今回、新たな熱光源材料として、カーボンナノチューブが最密充填した高密度のカーボンナノチューブ配向膜を用いた発光素子を開発し、可視～赤外の広波長帯域で発光する偏光した熱光源を実現しました。本成果は、直径 1 cm 以上にもなるマクロな材料から、「偏光」した熱放射をダイレクトに発生させることを実演したものです。また、カーボンナノチューブ配向膜の電氣的・熱的な異方性（注3）を利用することで、局所発光などの発光特性の制御にも成功しました。熱光源から得られる光が通常「非偏光」であることは、理科教育でも紹介されるような有名な物理現象ですが、本成果は、この従来の常識を覆す新しい熱光源であることを示しています。電気駆動の光源であることに加えて、マイクロサイズに微細加工したチップ上の偏光熱光源となることから、分析・センシング・光デバイスなどの様々な分野で、全く新しい偏光の応用を開拓すると期待されます。

本研究成果は、2022年3月7日に米国化学会（ACS）の ACS Materials Letters オンライン版で公開されました。

1. 本研究のポイント

- カーボンナノチューブ配向膜を用いることで、「熱光源は非偏光である」という従来の常識を覆し、偏光かつ広波長帯域で発光する熱光源を開発した。
- また、カーボンナノチューブ配向膜の電氣的・熱的な異方性を利用することで、局所発光などの発光特性の制御にも成功した。
- 電気駆動が可能でマイクロサイズに微細加工されたチップ上偏光光源となることから、分析・センシング・光デバイスなどの広い分野で、偏光を用いた応用を開拓すると期待される。

2. 研究背景

偏光は、光の最も重要な性質の一つであり、偏光を利用した技術は、分析・センシング・光デバイスなどとして、社会を支える技術の一つとなっています。例えば、基礎研究の分野では、エリプソメトリーや旋光度測定などの偏光分析が用いられ、磁性やスピントロニクス分野では、磁化やスピンをセンシングする手法として用いられるほか、産業的にも光通信などの光デバイスで積極的に用いられるなど、幅広く利用されています。

偏光を直接発生させる光源としては、現在、レーザー光源が用いられており、極めて高輝度であることや、発光スペクトルが単色で極めて狭線幅であるといった特徴を生かして広く応用されています。しかし、狭線幅のレーザーは、広い波長範囲でのスペクトル測定には利用できないことから、広波長領域での分析・センシングなどへの応用は困難でした。広波長帯域の光源としては、現在、通電加熱による黒体放射を用いた熱光源が用いられており、白熱電球としても広く知られています。しかし、従来の熱光源は、非偏光しか発生させることができず、レーザー光源のように直接偏光を発生させることはできませんでした。そのため、非偏光の熱光源から偏光を得るためには、偏光板を組み合わせることで偏光を取り出す必要がありました。この場合、光源自体がミリメートルオーダーの大きな素子であることに加えて、偏光のための偏光板を組み合わせる必要があり、高集積化は困難でした。

3. 研究内容・成果

今回、新たな熱光源の材料として、1平方センチメートルあたり10兆本と非常に多くのカーボンナノチューブが最密充填された「カーボンナノチューブ配向膜」に注目し、シリコンチップ上でデバイス化して可視～赤外で発光する熱光源を開発しました(図1 左図)。この素子に通電加熱して発光させたところ(図1 中央図)、黒体放射由来の広波長帯域の熱放射でありながら、ダイレクトに偏光が発生可能であることを明らかにしました。また、様々なカーボンナノチューブの配向方向を持つ素子を作製した結果、カーボンナノチューブの配向方向に沿った偏光が得られることを確かめました(図1 右図)。さらに、得られた発光特性や偏光特性から理論モデルを構築し、配向膜を構成するカーボンナノチューブの低次元性が大きく寄与していることや、偏光度がカーボンナノチューブの温度に依存して変化することも明らかにしました。また、カーボンナノチューブ配向膜の電気的・熱的異方性を積極的に利用することで、発光特性を制御したり、マイクロメートルオーダーの局所発光を実演したりすることにも成功しました(図2)。

4. 今後の展開

偏光は、分析・センシング・光デバイスなどの幅広い分野で利用されていることから、本研究で開発した広い波長帯域で偏光した光が直接得られる熱光源は、偏光を用いた新たな応用を開拓する新光源として期待されます。また、熱光源であるにもかかわらず、ピンセットでもつまめるマクロな材料から直接偏光が得られる現象は、理科教育でも紹介されるような「熱光源は非偏光である」という常識を覆すものであり、物理的にも大変興味深い成果です。開発した熱光源は、電気駆動で広い発光スペクトルを有する偏光光源であることに加えて、チップ上でマイクロサイズに微細加工することで、微小なチップ上の偏光熱光源となります。このような全く新しい偏光光源は、今後、分析・センシング・光デバイスなどの様々な分野において、偏光の応用を開拓すると期待されます。

本研究の一部は、科学研究費補助金(16H04355、23686055、18K19025、20H02210)、JST 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同(JPMJTR20R4)、地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所(KISTEC)戦略的研究シーズ育成事業、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(NIMS 微細加工プラットフォーム)、アメリカエネルギー省 BES プログラム(DE-FG02-06ER46308)、アメリカ国立科学財団(ECCS-1708315)、Robert A. Welch 財団(C-1509)の支援を受けて実施されました。

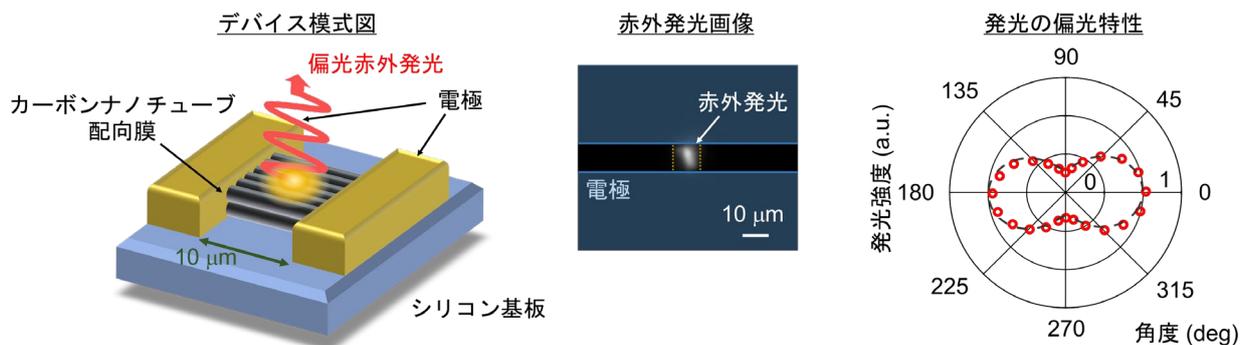


図1 左図：開発したカーボンナノチューブ配向膜の熱光源デバイスの模式図。
 中央図：実験で得られた近赤外カメラにおける発光カメラ像。
 右図：本熱光源の偏光発光依存性。本デバイスからの発光を偏光板を通して測定をした結果であり、偏光板の成す角度に対する光強度の依存性を示している。非偏光の場合、偏光板の角度によって測定される光強度は変わらないため光強度依存性は円の形状を示すが、右図の測定結果は0度方向に広く伸びた形状をしており、本デバイスが偏光発光していることを示している。

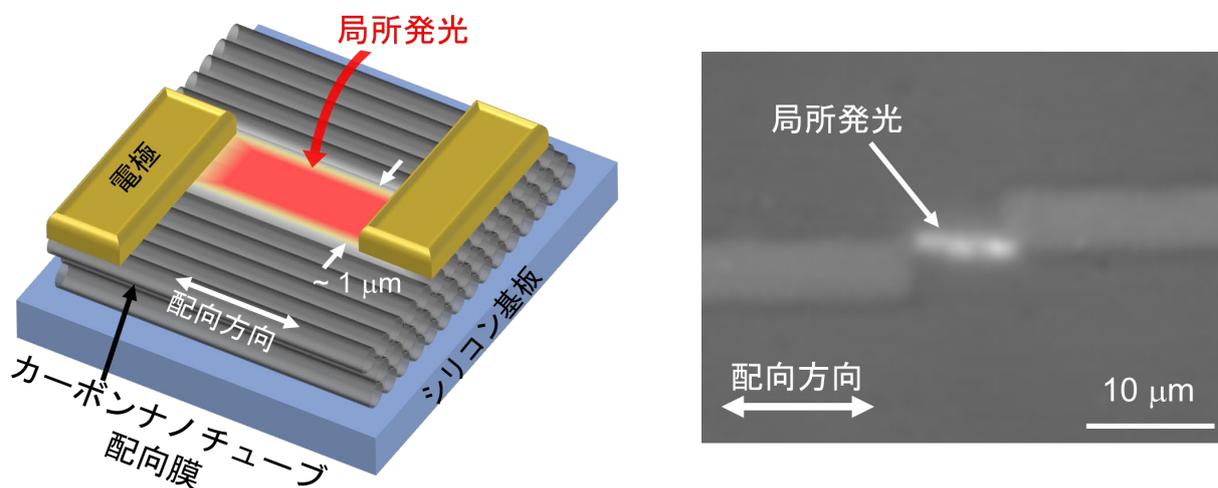


図2 左図：マイクロメートルオーダーの局所発光を実演したデバイスの模式図。電極の位置を意図的にずらすことにより、カーボンナノチューブ配向膜の異方的特性を活かし、幅 1 μm の局所発光を実現した。
 右図：実験で得られた局所発光の近赤外発光画像。電極間全体ではなく、電極（左）の上端から電極（右）の下端にかけての局所発光が観察された。

<原論文情報>

“Electrical Generation of Polarized Broadband Radiation from an On-Chip Aligned Carbon Nanotube Film”

Shinichiro Matano, Hidenori Takahashi, Natsumi Komatsu, Yui Shimura, Kenta Nakagawa, Junichiro Kono, Hideyuki Maki

ACS Materials Letters, <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.2c00058>

<用語説明>

(注1) カーボンナノチューブ配向膜

原子一層の炭素材料であるグラフェンを円筒状に丸めた直径 1 ナノメートルオーダーの一次元物質がカーボンナノチューブであるが、このカーボンナノチューブが同一方向に配列・積層して単結晶のようになった膜をカーボンナノチューブ配向膜と呼ぶ。1 平方センチメートルあたり 10 兆本と非常に多くのカーボンナノチューブが最密充填されており、全体的にはバルク材料であるが、カーボンナノチューブの配列に起因して、電気伝導率や熱伝導率は極めて高い異方性を有する。

(注2) 熱光源

あらゆる物質は、有限温度で熱放射することが知られており、黒体放射と呼ばれる。電球やヒーターでは、通電によるジュール加熱を熱光源として利用している。

(注3) 異方性

物質の物理的性質が結晶の方向によって異なること。本研究で用いたカーボンナノチューブ配向膜では、ナノカーボン配向膜の配向方向に対して、電気伝導率で一桁、熱伝導率で二桁以上異なっている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただきます。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 教授 牧 英之 (まき ひでゆき)

TEL : 045-566-1643 E-mail : maki@appi.keio.ac.jp <http://www.az.appi.keio.ac.jp/maki/>

Rice University 電気・コンピューター学科 教授 Junichiro Kono

E-mail : kono@rice.edu <https://kono.rice.edu/>

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (澤野)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640 Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>