

## 【助成 40-27】

メタ表面を用いる光マネジメント科学の実践—蛍光の 100%前方放出を目指して

研究者 京都大学大学院工学研究科 助教 村井 俊介  
アイントホーフエン工科大学 教授 Jaime Gómez Rivas

### 〔研究の概要〕

指向性ある蛍光を放つ「ナノアンテナ蛍光体」の蛍光強度向上を目指した研究を行いました。これまでに二酸化チタンからなるナノアンテナと蛍光体を用い、蛍光強度の増大と指向性の付与に成功しています。正面方向への蛍光強度はアンテナがない蛍光基板の 10 倍に迫る値に達し、また青色レーザー光から黄色蛍光への変換効率は蛍光基板と変わりませんでした。しかし、課題として、まだ有効利用できていない蛍光成分があることが挙げられます。垂直方向で 10 倍の発光強度の増強を示す試料でさえ、蛍光基板内で発生した蛍光の 50%程度しか前方に放っていません。残りの 50%は後方に放たれるか、側方に逃げています。本研究では、これらをすべて前方に放つことでさらに蛍光強度を高め、高輝度・狭角配光の超小型非コヒーレント指向性点光源としての特性を評価することを目的とします。そのために基板背面に青色を透過し黄色を反射する誘電体多層膜を成膜し、前方方向への発光強度の増加を調べました。

### 〔研究経過および成果〕

ナノサイズの粒子を基板上に周期的に並べた二次元構造は、光を平面内に強く閉じ込めたり、特定の方向へ集めたりする性質があります。このような構造は、光に対するアンテナ＝“ナノアンテナ”と呼ばれ、先端の光技術として研究が進んでいます。我々は、このナノアンテナと蛍光体を組み合わせた“ナノアンテナ蛍光体”を開発し、光源や照明応用を目指した研究を進めています。これまでに、黄色蛍光体基板の上にナノアンテナを作製し、青色レーザーと組み合わせて、指向性白色光源を設計・試作しました[1]。この試作品は、蛍光体から放たれる黄色光が基板表面に作製されたナノアンテナの作用を受けて前方方向に集められ、青色レーザー光と均一に混ざることによって、前方方向へ指向性を持った白色光を生成します。申請書作成

段階(2022 年 5 月)でメタ表面の無い場合に比べ垂直方向の発光強度では 10 倍の増強を達成しました[2]。申請時点の課題として、まだ有効利用できていない蛍光成分があることが挙げられます。垂直方向で 10 倍の発光強度の増強を示す試料でさえ、蛍光基板内で発生した蛍光の 50%程度しか前方に放っていません。残りの 50%は後方に放たれるか、側方に逃げています。本研究では、これらをすべて前方に放つことでさらに蛍光強度を高め、高輝度・狭角配光の超小型非コヒーレント指向性点光源としての特性を評価することを目的とします。

これまでの研究で、前方への光放出を高めるため、蛍光体基板背面に 2 種の酸化物の 2 層膜を成膜し、後方に放たれる蛍光を前方に反射する取り組みを行いました。本研究において、2 種の酸化物の 2 層膜を

3 層成膜し、反射強度を高めることで前方への発光強度を更に高めることを狙い研究を行いました。

スパッタ法を用い、ナノアンテナ蛍光体の背面に 2 種の酸化物の 2 層構造を 3 層積層させ、背面から青色レーザを入射し、前方へ放たれる蛍光を検出しました。未加工の蛍光体基板からの発光強度で規格化した蛍光増強度を比較すると、2 種の酸化物の 2 層構造を 1 層積層させた試料では最大で 10 倍程度の発光強度の増強が見られたのに対し、2 種の酸化物の 2 層構造を 3 層積層させると 16 倍程度まで増強度が高まることがわかりました(図 1)。また、透過スペクトルとの比較により、発光増強の波長は反射率の高い波長と一致することがわかりました。これらのことから、誘電体多層膜を背面に成膜することで、前方方向への発光強度を高めることに成功しました。今後は研究成果を論文にまとめると共に、更に積層回数を増やし、更なる発光増強を目指します。

また青色励起のナノアンテナ蛍光体の研究と並行して、アップコンバージョン機構を利用した赤外励起の可視ナノアンテナ蛍光体の研究も行いました。Si ナノ粒子からなるナノアンテナを用いることで、アップコンバージョン発光強度を大幅に増強することに成功しました[発表論文 1]。

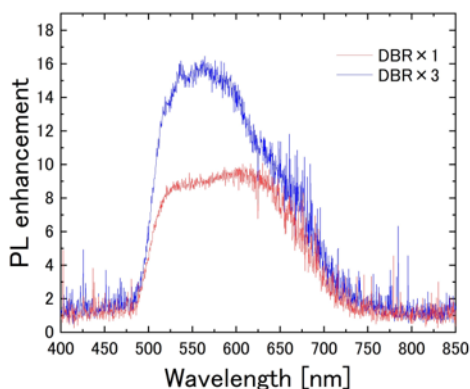


図 1: ナノアンテナ蛍光体の背面に 2 種の酸化物の 2 層構造を 1 組(図中赤線)、3 組(青線)成膜した試料における前方方向( $\theta_{em}=0^\circ$ )への発光増強。ここで発光増強は未加工の蛍光体基板からの発光強度に対する強度比として定義した。

[謝辞]

本研究の実施に当たり、カシオ科学振興財団からの助成金を試料作製の試薬や測定系構築のための光学部品の購入費に充てさせていただきました。記して謝意を表します。

[参考論文]

1. Enhanced photoluminescence and directional white-light generation by plasmonic array, Ryosuke Kamakura, Shunsuke Murai, Yusuke Yokobayashi, Keijiro Takashima, Masaru Kuramoto, Koji Fujita, Katsuhisa Tanaka, *Journal of Applied Physics*, **124** 213105 (2018).
2. Photoluminescence engineering with nanoantenna phosphors, Shunsuke Murai, Feifei Zhang, Koki Aichi, Katsuhisa Tanaka, *Journal of Materials Chemistry C*, **11**, 472-479 (2023)

[発表論文]

1. Enhancing Up-Conversion Luminescence Using Dielectric Metasurfaces: Role of the Quality Factor of Resonance at a Pumping Wavelength, Yuan Gao, Libei Liu, Shunsuke Murai, Kenji Shinozaki and Katsuhisa Tanaka, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15**, 39, 45960–45969 (2023)