

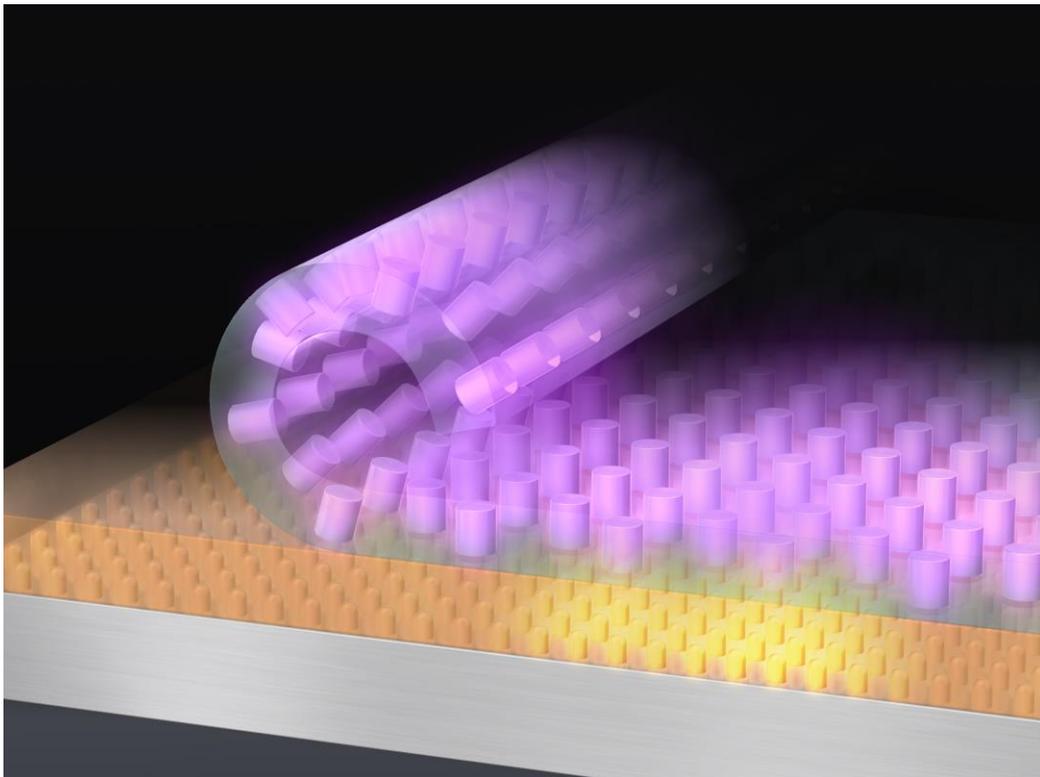
## 貼るだけで3次元ナノアンテナを作製 —サンドイッチでもっと明るく—

### 概要

村井俊介工学研究科助教、阿形健一 同修士課程学生(令和3年3月修了)、田中勝久 同教授は、3次元ナノアンテナを作製する新手法の開発に成功しました。この技術を発光素子に応用すると、発光をより明るくすることができます。ナノアンテナはナノ粒子を平面上に周期的に敷き詰めた構造で、例えば蛍光体基板の上にナノアンテナを作製すると発光の増大と指向性の付与が実現します。ナノアンテナを上下に重ねた3次元ナノアンテナができると、さらに大きな効果が期待できるのですが、これまで作製の困難さから研究が進んできませんでした。同研究グループは最近開発したナノアンテナシール技術を応用し、簡単に2層のナノアンテナが積層した3次元ナノアンテナ構造を作製する手法を開発しました。2層の間に発光層を挟むことで、両層のナノアンテナ効果を同時に受けた発光の増大と指向性の付与ができることを実証しました。

今回の実験はコンセプトの実証実験であり、それぞれのナノアンテナの構造と発光層の厚さには多くの改善の余地があります。今後の研究により、積層構造の最適化を通じた発光増強効果の最大化を目指します。

本研究成果は、2021年5月10日に国際学術誌「Journal of Applied Physics」にオンライン掲載されました。



## 1. 背景

ナノサイズの金属や誘電体粒子を平面基板上に周期的に並べた構造は、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とも言うことができ、“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、このナノアンテナを照明に応用できないかと考え、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。<sup>注1</sup>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。さらに最近（2021年1月）、多くの材料に自由に貼れて機能を発揮する“ナノアンテナシール”の開発にも成功しました。<sup>注2</sup>

もしナノアンテナ構造を3次元に拡張できれば、さらに自由な光制御が可能になります。単純に考えると、ナノアンテナの上にもう一層ナノアンテナを作製すれば3次元構造が得られます。しかしながらナノアンテナはどんな基板の上にも作製できるわけではありません。高度な複数の工程を経て作製するため、すべての工程に適合する材質や形状に厳しい制限があります。特に基板は平坦でなければならず、ナノアンテナの上に新たなナノアンテナを重ねて作製するのは困難でした。本プロジェクトは、ナノアンテナシールを使ってこの問題を解決し、簡単に積層3次元ナノアンテナを得ることを目的としました。さらにコンセプトの実証実験として、ナノアンテナ2層の間に発光層を挟み、2層の発光制御効果が同時に得られることを示しました。

## 2. 研究手法・成果

ナノアンテナシールは柔軟で適度な接着性を持つため、基板上に作ったナノアンテナやシール同士で密着性良く貼り合わせ、簡単に積層ナノアンテナが得られます。今回は積層ナノアンテナによる発光制御効果を明確に示すため、発光層を2枚のナノアンテナではさんだサンドイッチ構造を作製しました。作製手順は、まず石英ガラス基板上に青色光に共鳴するナノアンテナを作製し、そこに発光物質として青色光を吸収し赤色を放つ色素を分散させた発光層を塗布しました。最後に赤色光に共鳴するナノアンテナシールを密着させ試料の完成です。このサンドイッチ試料に青色光を照射すると、まず青色光に共鳴するナノアンテナの効果で発光層が強く青色光を吸収します。色素からの発光はさらに赤色光と共鳴するナノアンテナにより指向性をもって放たれます。すなわち、サンドイッチ試料からの発光は、それぞれのナノアンテナ効果が掛け合わされた効果を受けることが実証できました。

## 3. 波及効果、今後の予定

今回の研究で2枚のナノアンテナを重ねた時、両者の掛け合わせの効果が得られることがわかりました。これは積層ナノアンテナの設計を見通し良くします。今後は青色・赤色のそれぞれの波長でより強く共鳴するナノアンテナを開発し、積層した際の発光増強の最大化を狙います。これは発光素子の高性能化・省エネ化に貢献します。また、発光層を薄くしていくと2枚のナノアンテナ間に相互作用が働き、積層ナノアンテナが個々のナノアンテナの掛け合わせでは記述できなくなります。これは積層ナノアンテナの設計を困難にする一方で、ナノ光学分野の新展開に寄与する可能性があり、別方向の研究として発光増強の最大化と並行して取り組んでいきます。

## 4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、科学研究費補助金(19K22055, 19K22058, 19H02434)と増屋記念基礎研究振興財団の支援

を受け行われました。本研究の一部は、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点を利用して(JPMXP09F19NMC042)行われました。

#### <研究者のコメント>

今回の成果はナノアンテナを 2 次元の制約から解放し 3 次元へと拡張するもので、ナノアンテナの応用上、大きな意味があると考えています。どんどん新しい応用にチャレンジしていきたいです。

#### <注釈>

**注1** : Enhanced photoluminescence and directional white-light generation by plasmonic array (プラズモニクアレイによる蛍光増強と指向性白色生成)、鎌倉涼介、村井俊介、横林裕介、高島啓次郎、倉本大、藤田晃司、田中勝久、Journal of Applied Physics、**124号** p.213105 (2018).

<参考> 京都大学プレスリリース「次世代の指向性白色光源の開発に成功 – ナノアンテナで明日を照らす –」 <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2018-12-06>

**注2** : Stick-and-play metasurfaces for directional light outcoupling (指向性光取り出しのための貼って使えるメタサーフェス)、阿形健一、村井俊介、田中勝久、Applied Physics Letters、**118号** p.021110 (2021).

<参考> 京都大学プレスリリース「貼るだけで灯りを明るくするナノアンテナシールの開発に成功」 <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-01-15-1>

#### <論文タイトルと著者>

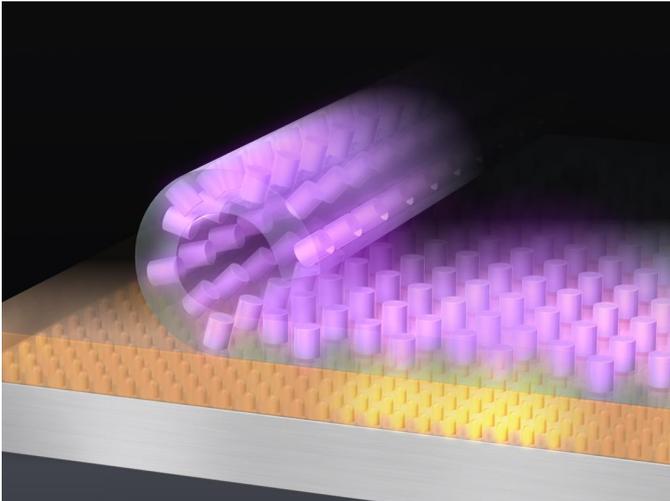
タイトル : Photoluminescence from an emitter layer sandwiched between the stack of metasurfaces (重なった 2 枚のメタサーフェスにサンドイッチされた発光層からの発光増強)

著者 : 村井俊介、阿形健一、田中勝久

掲載誌 : Journal of Applied Physics

DOI : <https://doi.org/10.1063/5.0047352>

<イメージ図>



2層のナノアンテナに挟まれたサンドイッチ試料。ガラス基板上に青色光に共鳴するナノアンテナを作製し、その上に発光層（図中黄色の層）を塗布、最後に赤色に共鳴するナノアンテナシールを貼って作製した。発光層はそれぞれのナノアンテナの効果を同時に受け、強く発光します。