

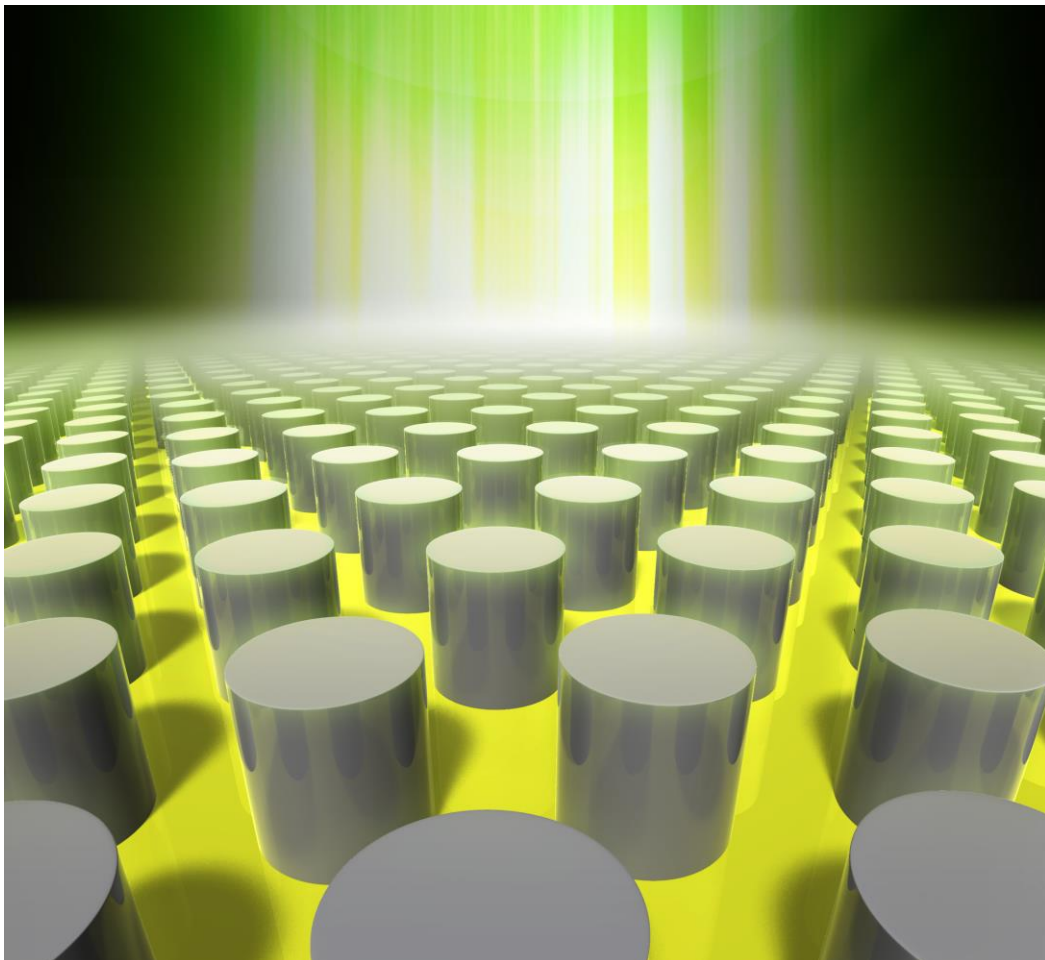
次世代の指向性白色光源の開発に成功

— ナノアンテナで明日を照らす —

概要

京都大学大学院工学研究科 鎌倉涼介 博士課程学生（研究当時、現：スタンレー電気株式会社 研究員）、村井俊介 助教、藤田晃司 同教授、田中勝久 同教授、スタンレー電気株式会社 横林裕介 研究員らの研究グループは次世代型の指向性白色光源開発に成功しました。広く普及している白色 LED の次の照明として、青色 LED の代わりに青色レーザーダイオードを用いる高輝度白色光源が一部実用化されています。このタイプの光源は青色レーザーと、青色を吸収して黄色に光る蛍光体からなりますが、まっすぐ進む青色レーザーと全方向に光る黄色の混色が難しい問題点がありました。本研究では、金属ナノシリンダー周期アレイ構造を蛍光体基板上に作製することでこの問題を解決しました。蛍光体基板からの蛍光は全方向に放たれますが、金属ナノシリンダーアレイが蛍光の方向を揃える「ナノアンテナ」として働き、青色と蛍光の放射方向を揃えることで指向性を持った白色光を作り出すことができました。また前方方向に蛍光を集めることで、前方方向への蛍光強度はアレイのない基板に比べ最大7倍にまで高められました。理論的にはさらに蛍光強度を高められる可能性があり、今後は強度を理論に近づける研究を継続するとともに、この技術を実際の照明に組込む研究に取り組んでいきます。

本研究成果は、2018年12月6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

白色 LED は青色 LED と、青色を吸収して黄色に光る蛍光体の組み合わせからなり、吸収されなかった青色と黄色の混色により白色を得る装置です。現在、より高輝度の照明応用に向け青色レーザーを使った白色光源の開発が進んでいます。青色 LED を青色レーザーに置き換えるだけ、と考えると簡単に思えますが、青色レーザーは青色 LED に比べ直進性が強くハイパワーであるため、解決しなければならない以下の問題が生じます。

- ① 色の問題：青色レーザーが指向性をもって直進するのに対し、黄色蛍光は全方向に放たれます。角度によって青色と黄色の割合が変わり、均一な白色が得られません。
- ② 熱の問題：ハイパワーの青色レーザーが入射すると、黄色蛍光体が加熱されます。従来の白色 LED では、黄色蛍光体は粉末をプラスチックのバインダーで固めたものを使用しているため、加熱によりバインダーが劣化してしまいます。また、高温になると蛍光の発光が弱くなる、温度消光と呼ばれる問題があります。これまでは青色レーザー光を散乱させて指向性を失わせて使用したり、強力な冷却機構を取り付けたりすることで2つの問題を解決を図ってきました。しかしながらこれらは青色レーザーの直進性を活かした解決策ではなく、今後ますますレーザーのハイパワー化が進むことを考えると、付け焼刃的な対処でしかありませんでした。

本共同プロジェクトは、これらの問題を本質的に解決することを目的として、光科学のナノテクノロジーを持つ京都大学のグループと、半導体および照明技術を持つスタンレー電気グループのコラボレーションにより2014年にスタートしました。両者の得意な技術を融合させた継続的な研究が、今回の成果に結実しました。

2. 研究手法・成果

本研究のキーテクノロジーは「ナノアンテナ」です。金属ナノシリンダーを光の波長スケールの周期（数百ナノメートル^{注1}）で並べたアレイ構造は、光をアレイ面内に閉込めたり、特定の方向に放出する作用があります。あたかも光に対するナノサイズのアンテナのように働くことから、金属ナノシリンダー周期アレイを「ナノアンテナ」と呼んでいます。京都大学の研究グループは以前、アルミニウムのナノアンテナにより、アレイ上に塗布した蛍光体薄膜（厚さ650ナノメートル）からの発光を大幅に強めることに成功していました^{注2}。今回はその技術を応用し、厚さ200マイクロメートルの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。この試作品は、上記①②の問題を以下のように解決しました。

- ① 色の問題：基板からの黄色蛍光がアレイを通過する際にアンテナ作用を受け、基板垂直方向に放出されます。そのため吸収されずに透過する青色レーザーと進行方向が揃い、角度依存の少ない均一な混色が実現しました。また、垂直方向に光が集まるので、垂直方向ではナノアンテナの無い場合に比べ7倍の発光増強が実現しました。
- ② 熱の問題：プラスチックのバインダーが無い蛍光体基板を使ったので、バインダーの劣化を考える必要がなくなりました。蛍光基板は蛍光体粉末をバインダーで固めた蛍光体層よりも熱伝導度が高いため、温度が上がりやすく、温度消光の問題が解消しました。

3. 波及効果、今後の予定

蛍光基板内で発生した蛍光をすべて前方に放つことができれば、理論的にはさらに蛍光強度を高められます。今後は強度を理論予測に近づけるために、シリンダーの材質や形状を含むアレイの最適な構造を追求します。

並行して、この技術を核にしてレンズ、反射板など最適なパッケージング設計を行い、実際の照明に組込む実用化に向けた研究に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、JST さきがけ、旭硝子財団、ナノテク CUPAL の支援を受け行われました。

<研究者のコメント>

厚さ 100nm (= 蛍光体基板の 1/2000) のナノアンテナ 1 層がこれほど劇的な効果を生むとは思いませんでした。開発者が一番驚いています。しかしまだ予測される限界値には届いていません。今後の研究開発で更なる高効率指向性白色光源を目指します。

<用語解説>

注 1: 1 ナノメートル=10 億分の 1 メートル。100 ナノメートルはインフルエンザウイルスと同じ大きさ。

注 2: G. Lozano, D. J. Louwers, S. R. K. Rodriguez, Shunsuke Murai, O. T. A. Jansen, M. A. Verschuuren, and J. G. Rivas, *Light: Science & Applications* (2013) **2** e66;

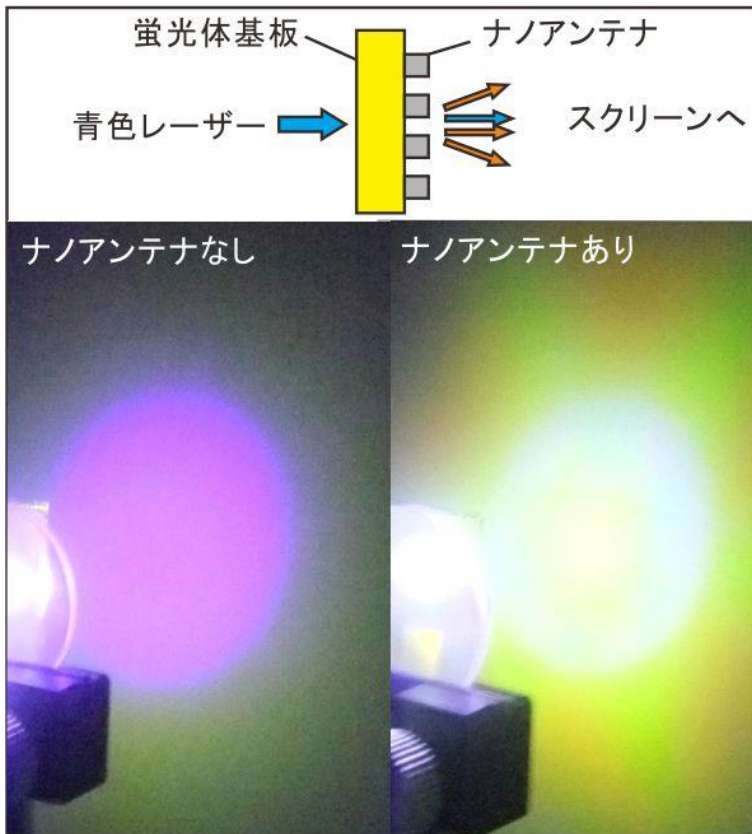
<論文タイトルと著者>

タイトル: Enhanced photoluminescence and directional white-light generation by plasmonic array (プラズモニックアレイによる蛍光増強と指向性白色生成)

著者: 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

掲載誌: *Journal of Applied Physics*

<イメージ図>



ナノアンテナがない蛍光基板とナノアンテナがある基板に青色レーザーを照射し、透過光を白色スクリーンに映した比較写真。ナノアンテナがない場合は透過する青色レーザー光がメインであるのに対し、ナノアンテナがある場合は黄色が大幅に増強された結果、青色との混色により白色が実現します。