

Press Release

令和 8 年 6 月 17 日

兵庫県立大学

アルミニウム薄膜で発光効率が向上

【概要】

兵庫県立大学大学院理学研究科の小簗剛准教授と宮本晟那大学院生の研究グループは、アルミニウム薄膜が有機薄膜からの発光を強める効果を発見しました。通常、アルミニウムのような金属薄膜は、その表面から数百 nm 以内の距離に置かれた材料からの発光を弱めます。しかし、アルミニウム薄膜と発光材料の薄膜をディスク状にして重ねることで、発光が強くなることを明らかにしました。同研究グループは 2024 年に、金属薄膜による発光の減弱を抑制する技術を報告しています。この成果をさらに発展させたことが今回の発見に繋がりました。

アルミニウム薄膜と発光材料の薄膜を単純に積層すると、発光材料に蓄えられたエネルギーの数十%分がアルミニウム内にある自由電子に移動し、最終的には熱として消費されます。今回の成果は、このエネルギー消費を抑えるだけでなく、アルミニウムの自由電子に移動したエネルギーを発光の増強に再利用するものです。将来的には、発光デバイスの高効率化への応用が期待されます。

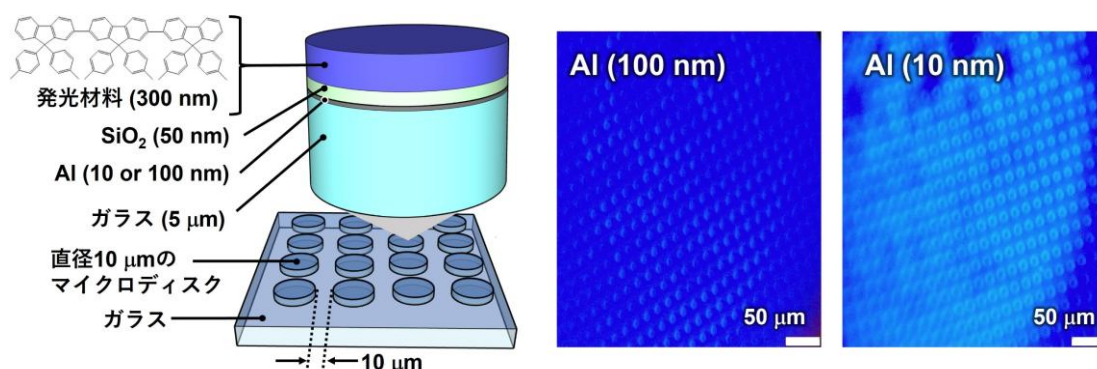


図 1 共振器の構造 (左). アルミニウムの膜厚が 100 nm の場合 (中) と 10 nm (右) における共振器の光励起発光画像.

【研究の背景】

電氣的に発光を得るデバイスでは、その電極材料に金属薄膜が用いられます。このような金属薄膜の表面から数百 nm 以内の距離に置かれた分子が励起状態^[1]にあるとき、励起状態のエネルギーの何割かは、金属薄膜の表面上を動く電磁波を生み出すことに使われます。この電磁波を伝搬型プラズモンと呼びます。伝搬型プラズモンは、金属表面上を移動して励起状態の分子から離れ去り、最終的に熱となって消失します。その移動距離 (生成から消失まで) は、典型的な値でおよそ 1 μm ^[2] です。したがって、金属/発光材料の積層膜を発光デバイスに利用した場合、薄膜表面に平行な方向の長さが 1 μm 程度を超えると発光が弱められてしまいます。これが、一般的に起こる問題です^[3]。

デバイスのサイズは 1 μm 程度よりも十分大きい方が取扱いは容易になります。比較的大きな発光デバイスを用いて、上述の問題を解決するには、以下の方法が考えられます。①伝搬型プラズモンを励起状態の分子の近くに常に留まらせる。②伝搬型プラズモンが消失するまでに移動する距離を長くする。これらのことが実現できれば、発光の減弱を抑えられるだけでなく、発光を増強することも期待されます。実際に、ナノメートルサイズの金属上に発現する局在型プラズモン^[4]には、発光の増強効果があることが知られています。以上の経緯から、当該研究グループでは、比較的大きな金属薄膜に①と②を適用することに取り組んできました。同グループは 2024 年に、発光材料の薄膜と金属薄膜をお椀状に重ねることで、金属薄膜による発光の減弱を抑制することに成功しています。しかし、発光の増強までには至らず、また、お椀状の構造は発光デバイスへの応用に有利な二次元構造を有していないことが課題として残されていました。

【研究の成果】

上記の①に関して、光共振器^[5]を利用しました。青色の発光材料とアルミニウム薄膜をディスク状に重ねて光共振器を作製しました。伝搬型プラズモンはアルミニウムのディスクの周囲を周回します。1 周すれば元の位置に戻るため、伝搬型プラズモンを励起状態の分子の近くに留めることができます。また②に関して、アルミニウム薄膜の厚さを 10 nm にしました。金属を薄くすることで伝搬型プラズモンが消失するまでに移動する距離を伸ばすことができます。2024 年の研究においても①と②の工夫を講じましたが、今回は、光共振器の直径を以前の 20 μm から 10 μm に縮小しました。この変更により、伝搬型プラズモンをさらに消失させにくくしました。さらに、今後の発光デバイスへの展開を見据え、お椀状から二次元構造を有するディスク状へと変更しました。

光共振器の模式図を図 1 に示します。アルミニウム/ SiO_2 /発光材料の部分が光共振器です。高さ 5 μm のガラスの円柱の上から各層を成膜することで、光共振器を作製しました。発光材料とアルミニウムの間にある SiO_2 の層は、発光材料とアルミニウムの接触で起こる発光の減弱を抑制するためのものです。

発光材料薄膜の光励起発光 (PL) 量子収率^[6]は、アルミニウム薄膜や光共振器を用いない参照試料で 65% です。膜厚 100 nm のアルミニウム薄膜を用いた光共振器では、伝搬型プラズモンによるエネルギー消失が起こり、PL 量子収率は 15% に低下しました。一方で、膜厚を 10 nm に薄膜化した光共振器では、PL 量子収率が 85% へと大幅に向上しました。実際に、PL 画像を比べると、両者の明るさに差があることが分かります (図 1)。さらに重要なことは、この PL 量子収率が参照試料よりも高いことです。この結果は、①、②の工夫と、共振器直径を 20 μm から 10 μm に変更したことによるものです。

コンピュータを利用してシミュレーションを行うと、発光とプラズモンが、それぞれ発光材料の薄膜とアルミニウム薄膜近傍に閉じ込められていることが分かります (図 2)。この結果から、発光とプラズモンが光共振器を周回することと、プラズモンは確かに発光材料の分子から逃げ去らないことが明らかになりました。

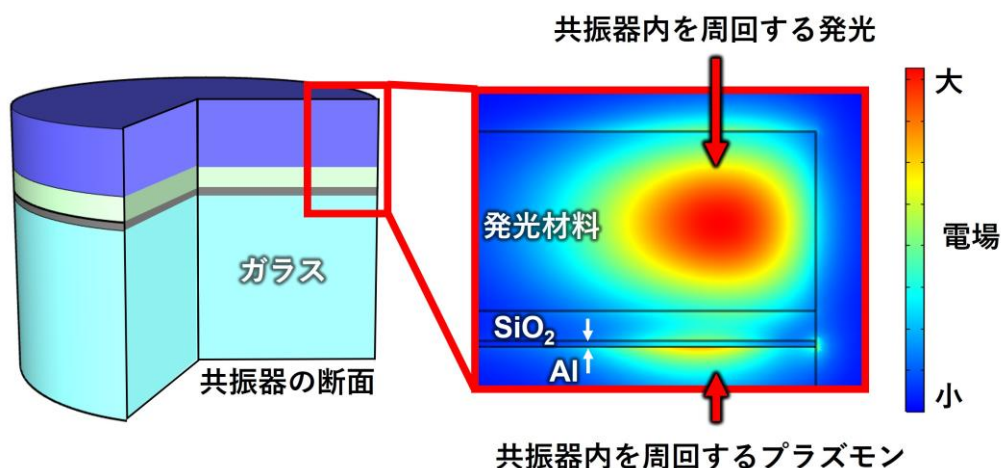


図 2 光共振器内に閉じ込められた電磁波のシミュレーション。

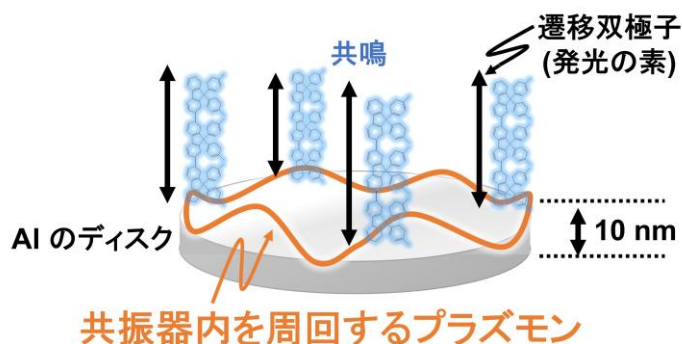


図 3 想定している発光効率向上の機構。遷移双極子とプラズモンの電磁場が共鳴することで発光が起こりやすくなると考えている。

情報解禁日 日本時間 2026 年 6 月 17 日 (水) 18:00

プラズモンの電磁波が励起状態の分子から逃げ去らずにいと、プラズモンの電磁波と遷移双極子^[7]との間で共鳴が起こります (図 3)。この共鳴に起因して、発光効率が向上したものと考えられます。

【今後の展開】

研究グループでは、今後、プラズモンの電磁波と遷移双極子との共鳴が、どのような機構で発現するのかを実験および理論の両面から明らかにする方針です。また、今回の成果は PL に関するものですが、電氣的に発光材料を励起した場合においても発光効率が向上するのかを確認する予定です。アルミニウム薄膜は、発光デバイスの電極材料として利用されるため、発光効率を向上する電極材料の開発が見込まれます。将来的には、この技術が、発光デバイスの高効率化に活かされることが期待されます。

【論文情報】

論文名 : Photoluminescence enhancement by propagating surface plasmons confined in microresonators

掲載紙 : Scientific Reports

著者 : Seina Miyamoto and Takeshi Komino*

兵庫県立大学大学院理学研究科

*責任著者 : 兵庫県立大学大学院理学研究科 小簗 剛

【補足説明】

[1] 励起状態

原子や分子に含まれる電子が通常よりも高いエネルギーを蓄えている状態。

[2] 金属の種類はアルミニウム、波長範囲は青色の可視領域である場合。

[3] 金属薄膜上にナノメートルスケールの細かい凹凸があれば、この問題を払拭できるとする報告がある一方で、平滑な金属薄膜においては困難である。

[4] 局在型プラズモン

ナノメートルスケールの金属材料に閉じ込められたプラズモン。伝搬型とは異なり空間的に局在化するため、励起状態の分子から離れ去ることはない。

[5] 光共振器

電磁波を閉じこめるための構造。光だけでなく、プラズモンも閉じ込めることができる。

[6] 光励起発光量子収率

励起状態を生成するために必要な外部入射光の量に対する発光の量の割合。外部からの光照射で発光を得る実験によって測定する。0~100%の値があり、値が大きい程、発光効率が高い。

[7] 遷移双極子

励起状態において発現する振動する双極子。発光を生むため、発光の種と捉えられる (図 3)。励起状態では電子が分子内で振動しており、この振動は原子核の背景に対して起こるため、負電荷 (電子) と正電荷 (原子核) の組である双極子が振動することになる。

【研究グループ】

兵庫県立大学

大学院理学研究科

大学院生
准教授

宮本 晟那 (ミヤモト・セイナ)
小簀 剛 (コミノ・タケシ)

情報解禁日 日本時間 2026 年 6 月 17 日 (水) 18:00

【研究支援】

本研究は、以下の助成を受けて実施されたものです。

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C) (23K04881)

研究課題 長距離伝搬表面プラズモンの WGM 共振器を利用した有機薄膜の発光増強とその波長制御

研究代表者 小簀 剛

研究期間 2023.4-2027.3

一般財団法人 中西奨学会 研究助成金

研究課題 エクサスケールコンピュータへの応用を指向した光集積回路に実装が可能なリング型マイクロ光源の設計に関する研究

研究代表者 小簀 剛

研究期間 2025.4-2026.3

公益財団法人 プロテリアル材料科学財団 材料科学研究助成金

研究課題 10 nm の Al 薄膜上に立つ長距離伝搬プラズモンを利用した発光量子収率向上手法の開発

研究代表者 小簀 剛

研究期間 2026.4-2027.3

公益財団法人 日本板硝子材料工学助成会 研究助成

研究課題 電位制御による発光強度制御を志向した新規プラズモニックデバイスの開発:金属薄膜ディスク/SiO₂ ガラス薄膜/発光性有機薄膜ディスクのハイブリッド構造

研究代表者 小簀 剛

研究期間 2024.4-2027.3

【問い合わせ先・機関窓口】

<問い合わせ先>

兵庫県立大学 大学院理学研究科

准教授 小簀 剛 (コミノ・タケシ)

Tel: 0791-58-0160

Email: komino@sci.u-hyogo.ac.jp

<機関窓口>

兵庫県立大学 播磨理学キャンパス経営部総務課

Tel : 0791-58-0101 (内線 212)

Fax : 0791-58-0131

Email: soumu_harima@ofc.u-hyogo.ac.jp