

希土類元素を用いたアップコンバージョン波長変換による赤外線検出技術

環境エネルギー工学専攻 エネルギー量子工学コース
レーザー応用工学領域 猿倉研究室 赤部 勇午

1. 研究背景

近赤外光は、光通信、センシング、材料評価など幅広い分野で利用されている。一方で、この波長域の光は人の目では見ることができず、像として直接観測するには専用の検出器が必要となる。そのため、観測系は高価になりやすく、装置構成の自由度も限られる。特に $1.5\ \mu\text{m}$ 帯は通信で重要な波長域であるが、この波長を簡便に可視化する方法は多くない。そこで本研究では、エルビウム (Er^{3+}) を添加した CaF_2 結晶のアップコンバージョン発光に着目し、 $1510\ \text{nm}$ の近赤外光を可視光へ変換して観測するイメージング手法に取り組んだ。近赤外光を一度見やすい波長に変換できれば、通常の可視光用検出器を用いて空間情報を像として読み出すことができる。これは、近赤外専用カメラに頼らずに「見えない光を見える形で扱う」ための新しい手段になると期待される。本研究では、 Er^{3+} のエネルギー準位構造を利用し、近赤外光の情報を保持したまま可視光へ変換できるかを検証した。さらに、単に発光を得るだけでなく、近赤外光の空間分布を失わずに可視像として読み出すシステムを実証した。

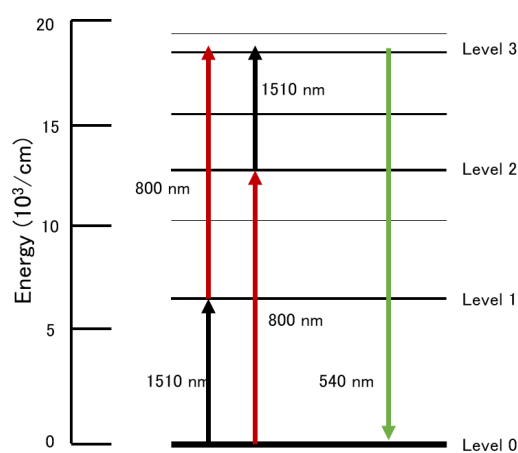


図1: Er^{3+} のエネルギー準位図

2. イメージングの原理

図1に、本研究で用いた Er^{3+} のエネルギー準位の概略を示す。 Er^{3+} イオンは、まず $800\ \text{nm}$ の光によって中間準位へ励起され、その後 $1510\ \text{nm}$ の近赤外光を受けることでさらに高い準位へ遷移する。励起されたイオンはその後緩和し、 $540\ \text{nm}$ 付近の可視アップコンバージョン発光を生じる。すなわち本研究では、 $1510\ \text{nm}$ の近赤外光を直接検出するのではなく、その情報を $540\ \text{nm}$ 付近の可視発光として取り出している。この方法では、入射した近赤外光の分布に応じて発光の空間分布も変化するため、光の有無だけでなく、その形や強度分布も像として読み出せる。 Er^{3+} の多準位構造を利用したこの波長変換が、本研究の基本原理である。可視域に変換された信号は一般的な Si 系検出器で扱いやすく、観測系を比較的簡便に構成できる点も利点である。

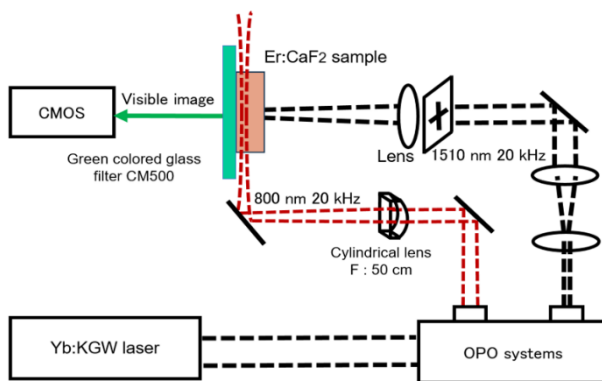


図2: 実験セットアップ

3. 実験方法

図2に実験セットアップの概略を示す。 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶に対して、 $800\ \text{nm}$ の予備励起光と $1510\ \text{nm}$ の近赤外光を照射し、結晶中で生じたアップコンバージョン発光を可視光用の検出器で観測した。 $1510\ \text{nm}$ 光

の空間分布は光学系によって結晶面上へ導かれ、結晶内で可視発光へ変換される。ここで重要なのは、結晶が単なる発光体ではなく、近赤外像を可視像へ変換する波長変換媒体として機能している点である。実験では、2つの光が結晶内で適切に重なるように光学配置を調整し、発生した可視発光をカメラで記録した。本手法では、通常は近赤外専用カメラが必要な波長域に対して、可視域に感度を持つSi系検出器を利用できる可能性がある。

4. 結果

まず、波長変換が生じていることを確かめるため、分光器を用いて結晶からの発光スペクトルを測定した。図3に示すように、近赤外光の照射条件下で可視域に明瞭なアップコンバージョン発光が現れ、1510 nmの情報が可視光として取り出せることを確認した。特に540 nm付近の発光は、イメージングで利用する主要な信号である。この結果は、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶が1510 nm光に応答して観測可能な可視信号を生じることを示している。

次に図4に、取得したイメージング結果を示す。図4(a)～(d)では、1510 nmの近赤外光の形状や強度分布が、可視アップコンバージョン発光像として観測されている。これは、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶を用いることで、通常はそのままでは見えない1510 nmの光を像として可視化できることを示している。また、得られた像からは、近赤外光の空間情報が保持されたまま読み出されていることが分かる。図4の各画像には明るさやコントラストの差が見られるが、いずれも対象の形状を反映した発光分布が得られており、本手法がイメージングとして機能していることが確認できた。

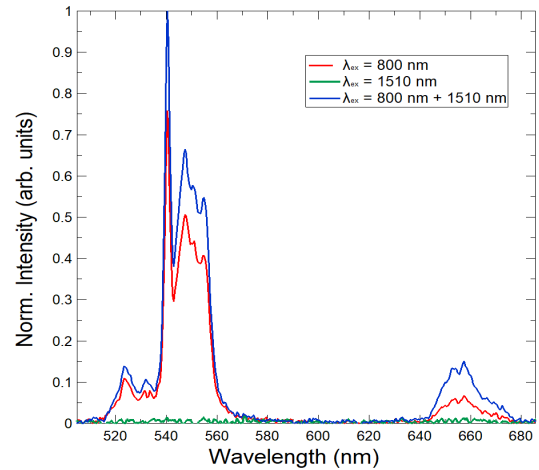


図3：発光スペクトル

5. まとめ

本研究では、 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 結晶のアップコンバージョン発光を利用し、1510 nmの近赤外光を可視光へ変換して観測するイメージング手法を示した。800 nmの予備励起と1510 nmの近赤外励起を組み合わせることで、近赤外光の情報を可視発光として取り出し、さらにその空間分布を像として読み出せることを確認した。本手法は、近赤外専用の高価な検出器に強く依存せず、可視光用の検出系で近赤外光を扱える可能性を持つ。今後、発光効率や空間分解能の向上が進めば、近赤外センシングや各種光計測への応用が期待される。

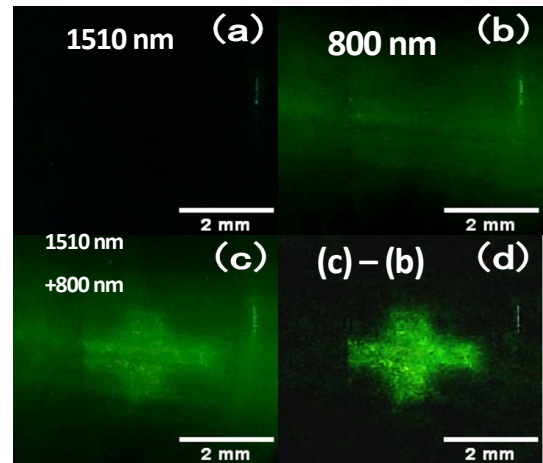


図4：UC イメージング結果

参考文献

- [1] Haase & Schäfer. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 50(26): 5808-5829, 2011.
- [2] Akabe, et al. *Opt. Lett.*, 49(14): 3998-4001, 2024.
- [3] Labbé, et al. *J. Lumin.*, 200: 74-80, 2018.
- [4] Elrafei, et al. *Opt. Express.*, 26(19): 25492-25506, 2018.
- [5] Ohashi, et al. *APL.*, 102(5): 051907, 2013.