

レーザーダイオード励起による 高出力な波長 3 μm 帯ファイバーレーザーの開発

Development of a high-power laser-diode-pumped fiber laser in the 3- μm wavelength region

(応用物理学会推薦)

代表研究者 京都大学化学研究所 岡崎 大樹

Institute for Chemical Research, Kyoto University Daiki OKAZAKI

Mid-infrared light sources in the 3- μm region are important for vibrational spectroscopy because many molecular bonds exhibit strong absorption in this spectral range. This project aimed to develop a high-power laser-diode-pumped fiber laser based on Dy-doped fluoride glass fibers. Fluorescence-lifetime measurements confirmed that concentration quenching was negligible even at a high Dy^{3+} concentration of 4 mol%, and FiberLabs fabricated a double-clad fluoride fiber with this concentration. The high Dy^{3+} concentration mitigated the weak pump absorption inherent to double-clad pumping. A cutback measurement under 1.28- μm diode pumping gave an absorption coefficient of approximately 0.73 m^{-1} , establishing a practical diode-pumping scheme and a guide for the required fiber length. Laser oscillation experiments using 1-, 2-, and 3-m fibers did not reach threshold, but broadband mid-infrared fluorescence was observed. These results indicate that the remaining issues are pump-density distribution, double-clad geometry, and facet robustness. We also developed a broadband 3 – 4- μm seed source using a Cr:ZnS laser and fluoride fiber. Future gain measurements will be used to optimize the double-clad geometry, increase pump density, analyze broadband fluorescence including excited-state absorption, and establish population inversion.

研究背景

中赤外域、特に波長 2-5 μm 付近は、図 1 に示すように C-H 基、N-H 基、O-H 基など多くの分子振動遷移が存在する重要な波長領域である。この波長域は「分子の指紋領域」と呼ばれ、分子種の同定、微量成分検出、同位体分析、環境計測、医療・生命科学計測、プラズマ診断などへの応用が期待されている[1,2]。従来の中赤外分光では熱光源やフーリエ変換赤外分光装置が広く用いられてきたが、計測感度、時間分解能、空間分解能、遠隔計測への展開という観点では、高スペクトル輝度を有する中赤外レーザー光源の導入が有効である。

一方で、波長 3 μm 帯のレーザー技術には現在も課題が残されている。量子カスケードレーザーは小型で安定な中赤外光源であるものの、単一光源での広帯域波長可変性や外部増幅の自由度には制約がある

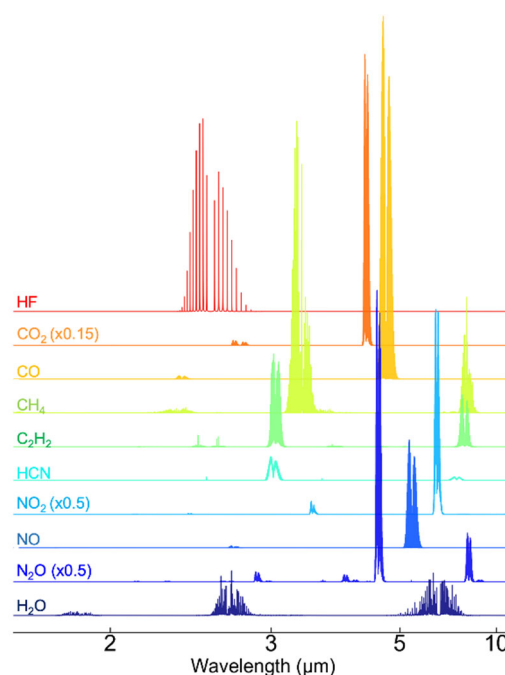


Fig. 1 Infrared absorption spectra of gaseous molecules.

[3]。また、非線形波長変換を用いる中赤外光源は広帯域性や高ピーク強度の点で優れるが、ポンプレーザーを含む装置構成が複雑になりやすく、電力から中赤外光への総合変換効率や長期安定性が課題となる。そのため、分子振動分光に直接利用できる、図2に示すような高出力・高効率・高安定な波長 3 μm 帯レーザーの開発は、基礎分光から応用計測までを支える基盤技術として重要である[4]。

希土類添加フッ化物ファイバーレーザーは、中赤外域で高効率かつ高出力な光源を実現し得る有力な手法であり、Dy 添加フッ化物ファイバーでは 2.8-3.4 μm にわたる波長可変発振や、3 μm 帯でのワット級発振が報告されている[5-7]。

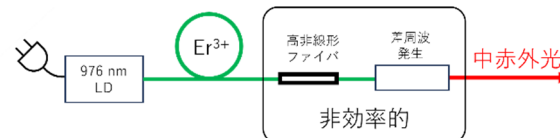
研究目的

本研究では、波長 3 μm 帯に広い蛍光帯域を有するジスプロシウム (Dy^{3+}) 添加フッ化物光ファイバーをレーザー材料として用い、レーザーダイオード (LD) 励起による高出力な中赤外ファイバーレーザーの実現を目指した。当初計画では、Dy 添加フッ化物光ファイバーの蛍光特性を評価した上で、波長可変なファイバーレーザー発振器を構築し、さらに LD 直接励起による光増幅器へ展開することで、ワット級出力の波長 3 μm 帯光源を実現することを目標とした。特に、直接 LD 励起は、励起用の固体レーザーや複雑な波長変換段を不要にできる可能性があり、装置全体の簡素化、電力-光変換効率の向上、長時間安定動作の観点から大きな利点を持つ。

研究経過と考察

まず、Dy 添加フッ化物材料の発光特性を確認するため、ファイバー試料およびバルクガラスをそれぞれ用いて、蛍光スペクトルおよび蛍光寿命を測定した。波長 3 μm 帯には広い発光帯域が観測され、中赤外レーザー材料としての有望性を確認した。また、Dy 濃度 4 mol% という高濃度添加条件においても、蛍光寿命の顕著な短縮は確認されず、濃度消光による失活が大きな問題とならないことを確認した。この結果は、高濃度添加によって短いファイバー長で励起吸収を高める設計が可能であることを示している。Dy 添加フッ化物ファイバーでは、 Dy^{3+} イオンの放射断面積が比較的小さいため、十分な利得長積を確保することが重要である。したがって、高濃度添加において失活が抑制されることを確認できた点は、

従来のレーザー光源



本研究の目標

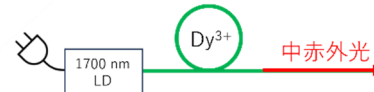


Fig. 2 Conceptual diagram of the present method and comparison with conventional methods.

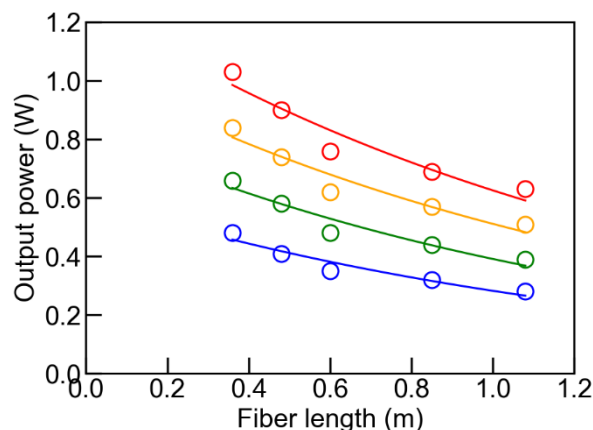


Fig. 3 Change in transmitted output measured by the cutback method. Different colors correspond to different pump powers.

波長 3 μm 帯ファイバーレーザーの高効率化に向けた重要な基礎結果である。

この知見に基づき、4 mol% Dy 添加ダブルクラッド・フッ化物光ファイバーを FiberLabs で作製した。ダブルクラッド励起では、励起光が大きなクラッド断面を伝搬するため、コア内の Dy^{3+} イオンとの空間的重なりが小さく、実効的な吸収が乏しくなりやすい。本研究では、高濃度添加ファイバーを用いることでこの吸収不足を補償し、LD 励起による 3 μm 帯ファイバーレーザー開発に適した試料を得た。これにより、高濃度添加とダブルクラッド励起を両立できる見通しが得られた。

次に、作製した 4 mol% Dy 添加ダブルクラッド・フッ化物光ファイバーに対し、LD 励起下での吸収特性を評価した。波長 1.28 μm の LD を用いてカットバック法を実施した結果、図3に示すように吸収係数として約 0.73 m^{-1} が得られた。この値から、現行のファイバー仕様では最大 3 m 程度のファイバー長により実用的な励起吸収が得られると見積もられた。また、カットバック法により吸収係数を定量化できたことで、必要ファイバー長、励起光結合条件、励

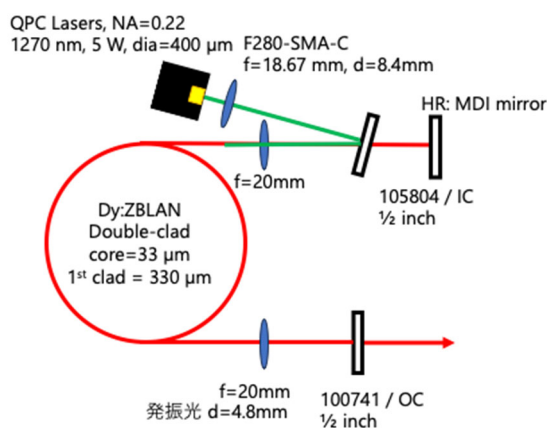


Fig. 4 Schematic of the constructed laser oscillator.

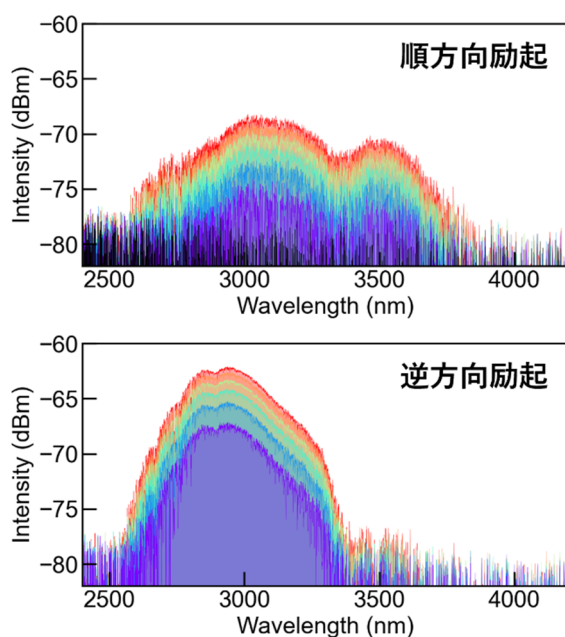


Fig. 5 Observed fluorescence spectra.

The upper and lower panels correspond to forward and backward pumping, respectively. Different colors correspond to different pump powers.

起パワーの見積もりが可能となり、1.28 μm LD を用いたダブルクラッド励起スキームを確立することができた。この結果は、今後の発振器および増幅器設計において、経験的な試行錯誤ではなく、吸収係数に基づいてファイバー長と励起条件を決定できることを意味している。

レーザー発振の実証に向けて、ファイバー長 1 m、2 m、3 m の条件で、図 4 に示すような外部共振器型の Dy 添加フッ化物ファイバーレーザーを構築した。ファイバー外部に高反射ミラーを配置し、波長 3 μm 帯の発振を狙った。励起条件、光軸、ファイバー長、共振器調整を変化させながら発振試験を行ったが、今回の条件では明瞭なレーザー発振は確認されな

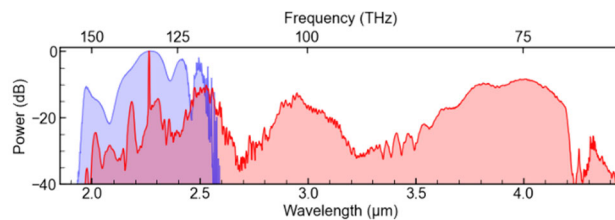


Fig. 6 Developed broadband light source spanning 2–4 μm . The spectrum in the 2.0–2.5 μm range corresponds to the laser output, which was red-shifted in a fluoride fiber to generate the longer-wavelength component.

った。一方で、励起時にはファイバーから広帯域な中赤外蛍光が観測された。図 5 に示すように、ファイバーの前方および後方に出射する蛍光スペクトルを比較したところ、ファイバー後方側での励起密度が十分ではない可能性が示唆された。さらに励起パワーを増加させることで利得増大を試みたが、約 4 W 励起時にファイバー端面の溶融が確認され、現行構成での強励起には限界があることが分かった。

以上の発振試験により、レーザー発振に至らない要因は、単なる共振器調整の問題ではなく、ファイバー長手方向の励起密度分布、ダブルクラッドの空間形状、励起光と Dy 添加コアとの重なり、および端面耐性にあることが明確になった。すなわち、今後の高出力化には、吸収係数の増大だけでなく、励起密度を高めるためのクラッド形状設計、端面保護、熱負荷分散を含めたファイバー構造全体の最適化が必要である。

発振試験の結果から、今後のファイバー再設計には、励起強度に対応した利得・損失スペクトルを直接測定することが不可欠であると判断した。そこで、波長 3 μm 帯のシード光源を新たに整備した。具体的には、中赤外固体レーザーである Cr:ZnS レーザーの出力[8]をフッ化物光ファイバーへ導入し、ラマン効果およびソリトン効果を利用して、図 6 に示す波長 3–4 μm にわたる広帯域パルスを発生させた。この光源は Dy 添加フッ化物ファイバーの利得帯域と重なっており、励起時・非励起時の透過スペクトルを比較することで、増幅利得、実効損失、再吸収帯域を評価できる。

まとめと今後の展望

本研究では、レーザーダイオード励起による波長 3 μm 帯 Dy 添加フッ化物ファイバーレーザーの実現を目指し、材料評価、ファイバー作製、励起吸収評価、発振試験、および利得評価用シード光源の整備

を行った。蛍光スペクトル測定により、Dy 添加フッ化物材料が波長 3 μm 帯に広い発光帯域を有することを確認し、蛍光寿命測定により、4 mol% という高濃度添加でも顕著な濃度消光が生じないことを明らかにした。これに基づき作製した 4 mol% Dy 添加ダブルクラッド・フッ化物光ファイバーに対し、1.28 μm LD 励起下でカットバック測定を行い、吸収係数約 0.73 m^{-1} を得た。一方、外部共振器による発振試験では広帯域な中赤外蛍光は観測されたものの、レーザー発振には至らなかった。前方・後方蛍光スペクトルの比較および高励起時の端面溶融から、励起密度分布、ダブルクラッドの空間形状、端面耐性が主要な課題であることが分かった。さらに、Cr:ZnS レーザーを用いた 3–4 μm 帯広帯域シード光源を整備し、今後の利得・損失評価に向けた実験基盤を確立した。

今後は、整備した 3–4 μm 帯シード光源を用いて、4 mol% Dy 添加ダブルクラッド・フッ化物光ファイバーの小信号利得および損失スペクトルを定量的に評価する。励起時・非励起時の透過スペクトル比較により、正味利得が得られる波長域、最適なファイバー長、許容される共振器損失を明らかにする。また、広帯域蛍光および透過スペクトル解析を通じて、励起状態吸収や再吸収の寄与を評価し、反転分布を効率よく形成できる励起条件を探索する。得られた結果に基づき、コア／クラッド比、クラッド形状、励起光結合条件、端面保護を最適化し、波長 3 μm 帯 Dy 添加フッ化物ファイバーレーザーの発振実証を目指す。その後、波長可変発振器および LD 励起ファイバー増幅器へ展開し、分子振動分光、同位体分析、プラズマ診断に利用可能な高輝度中赤外光源の実現を目指す。

参考文献

1. J. Haas and B. Mizaikoff, “Advances in mid-infrared spectroscopy for chemical analysis,” *Annu. Rev. Anal. Chem.* **9**, 45–68 (2016).
2. A. Schliesser, N. Picqué, and T. W. Hänsch, “Mid-infrared frequency combs,” *Nat. Photonics* **6**, 440–449 (2012).
3. W. Zhou, D. Wu, R. McClintock, S. Slivken, and M. Razeghi, “High performance monolithic, broadly tunable mid-infrared quantum cascade lasers,” *Optica* **4**, 1228–1231 (2017).
4. S. D. Jackson, “Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser,” *Nat. Photonics* **6**, 423–431 (2012).
5. M. R. Majewski, R. I. Woodward, and S. D. Jackson, “Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8 μm to 3.4 μm , pumped at 1.7 μm ,” *Opt. Lett.* **43**, 971–974 (2018).
6. R. I. Woodward, M. R. Majewski, G. Bharathan, D. Hudson, A. Fuerbach, and S. D. Jackson, “Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency,” *Opt. Lett.* **43**, 1471–1474 (2018).
7. V. Fortin, F. Jobin, M. Larose, M. Bernier, and R. Vallée, “10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm ,” *Opt. Lett.* **44**, 491–494 (2019).
8. D. Okazaki, W. Dai, E. Kauppinen, B. Mikladal, S. Chiashi, S. Maruyama, S. Ashihara, and S. Tokita, “Carbon-nanotube-assisted self-starting dispersion-managed Kerr-lens mode-locked Cr:ZnS laser delivering 0.7-MW peak power,” *Opt. Lett.* **51**, 3225–3228 (2026).

研究の発表

なし